

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

УТВЕРЖДАЮ
Декан Геологического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова
чл.-корр. РАН Н.Н. Еремин



«25» сентября 2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Теория электромагнитных зондирований

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

05.04.01. Геология

Магистерская программа:

Малоглубинная и глубинная геофизика

Форма обучения:

Очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
методической комиссией геологического факультета
(протокол № 6 от 8 сентября 2025)

Москва 2025

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», утвержденным приказом по МГУ от 30.12.2016 № 1674 (в действующей редакции).

Год приема на обучение: 2025.

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 профильному блоку вариативной части ОПОП, является обязательной. Курс магистратуры – 1, семестр – 1.

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия. Базируется на знаниях по дисциплинам «Математический анализ», «Линейная алгебра», «Дифференциальные уравнения», «Вычислительная математика», «Теория геофизических полей», «Электроразведка», «Некорректные задачи геофизики», «Интерпретация данных электроразведки».

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

Компетенции выпускников (коды)	Индикаторы достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с индикаторами достижения компетенций
ОПК-2.М.	М.ОПК-2.И-1. Использует на практике знания фундаментальных и прикладных разделов дисциплин, определяющих профиль подготовки, при решении исследовательских и прикладных задач профессиональной деятельности.	<i>Знать:</i> теоретические основы решения прямых одномерных задач электромагнитных зондирований, а также многомерных задач магнитотеллурических зондирований; основные закономерности распределения электромагнитного поля в рамках этих задач; <i>Уметь:</i> выбрать оптимальную методику интерпретации данных электромагнитных зондирований; построить априорную геоэлектрическую модель среды; оценить информативность электромагнитных зондирований по отношению к различным параметрам разреза; <i>Владеть:</i> методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований.
ОПК-4.М.	М.ОПК-4.И-2. Объективно оценивает полученные результаты, обобщает их, формулирует выводы.	<i>Знать:</i> возможности методов электромагнитного зондирования при решении различных геологических задач; <i>Уметь:</i> построить геоэлектрическую модель, согласующуюся с данными электромагнитных зондирований и априорной информацией, а также дать её геологическое истолкование; <i>Владеть:</i> подходами к построению физико-геологических моделей литосферы с использованием данных электромагнитных зондирований и других геофизических и геологических данных.
ПК-3.М.	М.ПК-3.И-4. Знает основные особенности интерпретации данных моделирования (по профилю подготовки).	<i>Знать:</i> пределы применимости одномерных, двухмерных и трёхмерных геоэлектрических моделей; <i>Уметь:</i> выбрать оптимальные методы моделирования при решении различных геологических задач; <i>Владеть:</i> методами построения геоэлектрических моделей разной размерности и с использованием различных способов параметризации.

ПК-6.М.	М.ПК-6.И-1. Имеет представление о современных методах обработки и комплексной интерпретации информации, используемых для решения производственных задач (по профилю подготовки).	Знать: теоретические основы методов анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований, а также их возможности при комплексной интерпретации геофизических данных; Уметь: выбрать оптимальную методику анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований при проведении комплексных геолого-геофизических работ; Владеть: методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований в комплексе геолого-геофизических исследований.
СПК-1.М.	М.СПК-1.И-2. Использует теоретические знания для построения геоэлектрических, плотностных и магнитных моделей различных геологических объектов.	Знать: электрические свойства горных пород и их зависимость от различных факторов, а также возможности методов моделирования данных электромагнитных зондирований; Уметь: строить геоэлектрические модели различных геологических объектов; Владеть: подходами к оценке чувствительности и разрешающей способности методов электромагнитного зондирования.
СМК-3.М.	М.СПК-3.И-1. Владеет методами обработки и интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки с учётом априорной геолого-геофизической информации	Знать: теоретические основы методов интерпретации данных электромагнитных зондирований; Уметь: выбирать оптимальную методику анализа и интерпретации электромагнитных данных при проведении комплексных геолого-геофизических исследований; Владеть: методами интерпретации данных электромагнитных зондирований с учётом априорной геолого-геофизической информации.

4. Объем дисциплины: 2 з.е., в том числе 28 академических часов на контактную работу обучающихся с преподавателем, 44 академических часов на самостоятельную работу обучающихся. Форма промежуточной аттестации – экзамен.

5. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов 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 контрольному опросу	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	14				14	14
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	15				15	15
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	15				15	15
Промежуточная аттестация <u>экзамен</u>	0	Устный экзамен*			0	
Итого	72	28			44	

* Промежуточная аттестация в форме экзамена проводится во время экзаменационной сессии, предусмотренной графиком учебного процесса

Развернутое содержание тем и разделов дисциплины

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 поляризации, 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

6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине.

6.1. 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».

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

Типовые контрольные вопросы при проведении промежуточной аттестации (экзамен):

1. Фундаментальная модель. Пространственные спектры. Уравнения Гельмгольца для спектров.

2. Теорема Липской-Ваньяна.
3. МТ и МВ способы определения спектрального импеданса.
4. Разделение геомагнитного поля на внешнюю и внутреннюю части.
5. Глобальное магнитовариационное зондирование.
6. ГМВЗ методами пространственных производных и отношения компонент.
7. Кривые МТЗ в 1D средах, их асимптоты.
8. Трансформация кривых МТЗ.
9. 1D интерпретация кривых МТЗ.
10. Линейные соотношения между компонентами МТ-поля.
11. Полярные диаграммы и инварианты тензора импеданса.
12. Главные значения и главные направления тензора импеданса.
13. Разделение локальных и региональных эффектов. Нормализация кривых МТЗ.
14. Разделение локальных и региональных эффектов. Методы Бара и фазового тензора.
15. Матрица Визе-Паркинсона. Двухточечные МТ-матрицы.
16. Решение прямых 2D и 3D задач МТЗ.
17. Решение обратных 2D и 3D задач МТЗ.
18. 2D интерпретация МТ-данных, чувствительность к геоэлектрическим структурам.
19. 2D интерпретация МТ-данных, устойчивость к 2D аппроксимации структур.
20. Общий граф магнитотеллурических исследований.
21. Гармонический ВМД над ГСС. Пространственные спектры компонент поля.
22. Гармонический ВМД над ГСС. Переход от пространственных спектров к компонентам поля.
23. Поле гармонического ВМД в ОПП.
24. Метод зондирования в ДЗ и ВМД.
25. Метод зондирования в БЗ ВМД.
26. Спектральный метод расчета становления поля.
27. Расчет становления поля для двухпетлевой установки.
28. Неустановившееся поле ВМД в ОПП.
29. Становление поля ВМД в ДЗ и в БЗ.
30. Кривые кажущейся проводимости.

6.3. Шкала и критерии оценивания

Результаты обучения, соответствующие виды оценочных средств	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания теоретических основ решения прямых 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>	Знания отсутствуют	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Систематические знания
Умения 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>	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает не принципиальные неточности	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы	Успешное умение
Навыки владения методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований <i>(письменный или устный опрос)</i>	Навыки владения отсутствуют	Фрагментарное владение методикой, наличие отдельных навыков	В целом сформированные навыки	Свободное владение и использование

7. Ресурсное обеспечение.

Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная

1. Пушкарев П.Ю. Прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований Земли. Петропавловск-Камчатский, Изд-во Новая книга, 2022, 144 с.
2. Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Магнитотеллурические зондирования горизонтально-однородных сред. М.: Недра, 1992. 250 с.
4. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ, 1997. 161 с.

Дополнительная

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.

8. Язык преподавания: русский.

9. Преподаватель: проф. Пушкарев П.Ю.

10. Разработчик программы: проф. Пушкарев П.Ю.