

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

УТВЕРЖДАЮ
Декан геологического
Факультета МГУ
чл.-корр. РАН Еремин Н.Н.



«25» сентября 2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Электроразведка неоднородных и анизотропных сред

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

05.04.01 Геология

Магистерская программа:

Малоглубинная и глубинная геофизика

Форма обучения:

Очная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
Учебно-методическим Советом
Геологического факультета МГУ
(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 «Электроразведка неоднородных и анизотропных сред» является освоение студентами-магистрантами основ изучения неоднородных и анизотропных сред с помощью методов электроразведки.

Задачи - освоение теории электрического поля постоянного тока в неоднородных и анизотропных средах; изучение методов математического моделирования поля кажущегося сопротивления и вызванной поляризации для двумерных и трехмерных сред..

Краткое содержание дисциплины (аннотация):

Курс «Электроразведка неоднородных и анизотропных сред» углубляет знания студентов по теории электрического поля постоянного тока в неоднородных и анизотропных средах, учит основным методам математического моделирования поля постоянного тока, позволяет овладеть современными методами интерпретации методов электроразведки на постоянном токе и вызванной поляризации, а также методике проведения полевых работ в условиях неоднородных и анизотропных сред.

1. Место дисциплины в структуре ОПОП – профессиональный блок вариативной части ОПОП, является дисциплиной по выбору. Курс – I, семестр – 1.

2. Входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:

освоение дисциплин «Геофизические методы исследования», "Теоретические основы обработки геофизических сигналов", "Уравнения математической физики", "Интегральные преобразования", «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 ОПК)	Индикаторы (показатели) достижения компетенций	Планируемые результаты обучения по дисциплине, сопряженные с компетенциями
МПК-1.	МПК-1. И-1 Определяет цели и задачи геофизических исследований МПК-1. И-2 Владеет методами проведения геофизических наблюдений и обработки данных МПК-1. И-3 Знает основы решения прямых и обратных задач геофизики, геологической интерпретации данных	Знать: основы теории постоянного электрического тока, методы математического моделирования поля постоянного тока, типы современной аппаратуры, подходы к решению обратной задачи, Уметь: выбрать оптимальную методику интерпретации данных электромагнитных зондирований; построить априорную геоэлектрическую модель среды; оценить информативность электромагнитных зондирований по отношению к различным параметрам разреза. Владеть: современными методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований в

		случае неоднородных и анизотропных сред.
--	--	--

4. Объем дисциплины составляет 3 з.е. (108 академических часа), в том числе **56** академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (32 часов лекций, 20 часов лабораторные работы и 4 часа семинаров), **52** академических часа на самостоятельную работу обучающихся (подготовка к лабораторным работам, подготовка к промежуточной аттестации, подготовка рефератов). Форма промежуточной аттестации – экзамен.

5. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических 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)				Самостоятельная работа обучающегося				
		Занятия лекционного типа	Занятия лабораторного типа	Занятия семинарского типа	Всего	Расчетно-графические работы	Работа с литературой (включая подготовку доклада)	Подготовка реферата	Подготовка к контрольному опросу	Всего
<u>Раздел 1.</u> Основные понятия теории постоянного тока и методы моделирования стационарного электрического поля.	4	4			4			0		0
<u>Раздел 2.</u> Методика изучения неоднородных и анизотропных сред.	52	14	10	2	26	10	6	6	4	26
<u>Раздел 3.</u> Интерпретация данных электроразведки методом сопротивлений и ВП для неоднородных и анизотропных сред.	52	14	10	2	26	10	6	6	4	26
<u>Промежуточная аттестация экзамен*</u>	0	Устный экзамен				0				
Итого	108	56				52				

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

РАЗВЕРНУТОЕ СОДЕРЖАНИЕ ТЕМ И РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

Содержание лекций

Раздел 1 Основные понятия теории постоянного тока и методы моделирования стационарного

Основные понятия теории постоянного тока и методы моделирования стационарного электрического поля.

Основные геоэлектрические модели среды в электроразведке методом сопротивлений: 1D, 2D, 3D. (геологические, методические и интерпретационные аспекты).

Понятие первичного и вторичного электрических полей. Первичное поле для источника, расположенного на границе неоднородности.

Граничные условия для стационарного электрического поля. Вторичные заряды.

Удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость. Электрическое поле в воздухе.

Раздел 2. Методика изучения неоднородных и анизотропных сред

Методы моделирования электрического поля в неоднородных средах (метод интегральных уравнений, метод конечных разностей, метод конечных элементов). Различия между 2D, 2.5D поперечным и 2.5D продольным моделированием.

Метод интегральных уравнений и использование различных типов вторичных источников (простой слой, двойной слой, объемная поляризация).

Понятие вызванной поляризации. Моделирование поля вызванной поляризации. Связь аномалий ВП с распределением удельного сопротивления.

Электрическое поле в анизотропной среде. Парадокс анизотропии.

Методика изучения неоднородных и анизотропных сред.

Раздел 3 Интерпретация данных электроразведки методом сопротивлений и ВП для неоднородных и анизотропных сред

Понятие метода электротомографии.

Выбор методики и установок для работ методом электротомографии (зависимость от аппаратуры, решаемых задач, способов интерпретации). Сравнение электроразведочных установок при изучении неоднородных сред.

Электротомография с многоэлектродной аппаратурой. Типы многоканальной аппаратуры.

Сравнение с методикой многоэлектродных зондирований.

Установки для изучения анизотропии. Возникновение отрицательного кажущегося сопротивления на круговых диаграммах.

3D электротомография. Векторная методика, вектор кажущегося сопротивления

Понятие обратной задачи. Неустойчивость обратной задачи. Разрешающая способность и детальность решения обратной задачи.

Способы решения обратной задачи.

Понятие инверсии и интерпретации геофизических данных. Сравнение автоматической и "ручной" интерпретации.

Способы регуляризации решения обратной задачи и их влияние на результаты инверсии.

Двумерная автоматическая интерпретация. Преимущества и недостатки.

Обработка и интерпретации данных анизотропии. Способы разделения эффектов анизотропии и неоднородностей.

План проведения семинаров.

Анализ модели вертикального контакта.

Анализ результатов численного моделирования для вертикального контакта. Влияние размеров области моделирования и дискретизации на результаты расчетов.

Способы решения прямой задачи ВЭЗ для горизонтально-слоистой среды.

Методики решения обратной задачи ВЭЗ для горизонтально-слоистой среды.

Расчет прямой задачи ВЭЗ для одномерной модели.

Способы расчета вызванной поляризации.

Анализ влияния геоэлектрического разреза на измеренное поле вызванной поляризации.

Расчетные домашние задания:

Аналитическое моделирование вертикального контакта

Моделирование методом интегральных уравнений для модели вертикального контакта

Расчет прямой задачи ВЭЗ.

Интерпретация профильных данных метода ВЭЗ.

2D моделирование для установки срединного градиента.

2D моделирование вызванной поляризации для установки срединного градиента

Примерные темы рефератов и докладов:

1. Сравнение различных подходов к моделированию электрического поля постоянного тока.
2. Программные комплексы 2d инверсии данных электротомографии.
3. Аппаратурные комплексы для электротомографии.
4. Сравнение электроразведочных установок, применяемых в электротомографии.
5. Программные комплексы для интерпретации данных в анизотропных средах.
6. Связь между аномалиями ВП и удельным сопротивлением.
7. Пакеты для 2D моделирования в системе Python - SimPEG, pyGIMLi.
8. Установка Multiple Gradient array
9. Сравнение различных подходов к 2D моделированию.
10. Особенности 2D инверсии данных электротомографии при задачах мониторинга.

6. Фонд оценочных средств (ФОС) 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 сдаче каждым студентом выполненных расчетных работ, при докладах (с презентацией), при защите рефератов.

Примерный перечень вопросов для проведения текущего контроля:

1. Вторичные заряды на примере одной неоднородности.
2. Электрическое поле на границе неоднородностей.
3. Поле для источника, расположенного на границе неоднородности при секторальном распределении УЭС.
4. Расчет электрического поля для вертикального контакта
5. Основные геоэлектрические модели среды в электроразведке методом сопротивлений: 1D, 2D, 3D.
6. 2D, 2.5D поперечным и 2.5D продольным моделированием.
7. Возникновение отрицательного кажущегося сопротивления в анизотропной среде.
8. Парадокс анизотропии.
9. Типы многоканальной аппаратуры.
10. Электротомография.
11. Различные установки в электротомографии.
12. 3D электротомография.

13. Бесконтактная электротомография.
14. Геологическая интерпретация и инверсия. Сравнение автоматической и "ручной" интерпретации.
15. Методы регуляризации решения обратной задачи.
16. Преимущества и недостатки двумерной автоматической инверсии.
17. Способы разделения эффектов анизотропии и неоднородностей.

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

Примерный перечень вопросов при промежуточной аттестации (экзамене):

1. Граничные условия для стационарного электрического поля, вторичные заряды и их связь с электрическим полем на примере одной неоднородности. Первичное и вторичное электрическое поле. Первичное поле для источника, расположенного на границе неоднородности.
2. Методы моделирования неоднородных сред (МИУ (простой, двойной слой и объемные диполи), МКР, МКЭ). Различия между 2D, 2.5D поперечным и 2.5D продольным моделированием.
3. Моделирование МИУ. Плюсы и минусы. 2D, 2.5D и 3D моделирование.
4. Моделирование МКР. Плюсы и минусы. 2D, 2.5D и 3D моделирование.
5. Электрическое поле в анизотропной среде, возникновение отрицательного кажущегося сопротивления. Парадокс анизотропии.
6. Интегральное уравнение для расчета электрического поля методом поверхностных интегральных уравнений. Дифференциальное уравнение для метода конечных разностей
7. Явление вызванной поляризации. Способы измерения параметров ВП. Связь между ВП и удельным сопротивлением. Расчет прямой задачи для вызванной поляризации.
8. Основные геоэлектрические модели среды в электроразведке методом сопротивлений: 1D, 2D, 3D (геологические, методические и интерпретационные аспекты).
9. Установки для изучения анизотропии.
10. Методика 3D томографии.
11. Принципы интерпретации геофизических данных. Геологическая интерпретация и инверсия. Сравнение автоматической и "ручной" интерпретации.
12. Способы регуляризации решения обратной задачи и их влияние на результаты инверсии.
13. Двумерная автоматическая инверсия. Преимущества и недостатки.
14. Обработка и интерпретации данных анизотропии. Способы разделения эффектов анизотропии и неоднородностей.

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

Результаты Обучения	«Неудовлетворительно»	«Удовлетворительно»	«Хорошо»	«Отлично»
Знания: основ теории постоянного электрического тока, методов математического моделирования поля постоянного тока, типов современной аппаратуры, подходов к решению обратной задачи.	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.	Умения отсутствуют	В целом успешное, но не систематическое умение, допускает неточности непринципиального характера	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы	Успешное умение
Владения: современными методиками электроразведки при выполнении геофизических исследований, существующим программным обеспечением для моделирования и интерпретации постоянного электрическим тока, современными программными решениями для подготовки, проведения, обработки данных и интерпретации при электротомографических наблюдениях на постоянном токе..	Навыки владения методами отсутствуют	Фрагментарное владение методами, наличие отдельных навыков	В целом сформированные навыки использования методов.	Владение методами, использование их для решения задач

8. Ресурсное обеспечение:

Перечень основной и дополнительной литературы.

- основная литература:

1. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика. Дмитриев В.И. 1982. 222 с.

2. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. Часть I. Гравитационные, электрические и магнитные поля. Пер. с английского.; - М.:Недра, 1997.- с. 250-258 и 286-305.

3. Электрическое зондирование геологической среды, ч.1. Прямые задачи и методика работ. Под ред. В.К.Хмелевского и В.А.Шевнина. - М., изд. МГУ, 1988 г., 176с
4. Электрическое зондирование геологической среды. Часть 2. Интерпретация и практическое применение. / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1992, 200 с.
5. Электроразведка методом сопротивлений. / Под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина: - М., изд. МГУ, 1994 г., 160 с.

- дополнительная литература:

1. Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences 27, 1019–1029.
2. Griffiths D.H., Turnbull J. and Olayinka A.I. Two-dimensional resistivity mapping with a computer- controlled array. First Break - 1990 - **8**, - 121-129.
3. Griffiths, D.H., Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. J. Appl. Geophysics 29, 211–226.
4. Loke, M.H. and Barker, R.D., Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 1996, p.131-152.
5. Альпин Л.М. Источники поля в теории электрической разведки // Прикладная геофизика, вып. 3. М., Госпотехиздат, 1947, с. 56-200.
6. Альпин Л.М., Даев Д.С., Каринский А.Д. Теория полей, применяемых в разведочной геофизике. М., Недра, 1985
7. Альпин Л.М. Метод вторичных зарядов//Прикладная геофизика. -1981- Вып.99-с.124-138.
8. Альпин Л.М. Практические работы по теории поля. – М.: Недра, 1971. – 305 с.
9. Бобачев А. А. Решение прямых и обратных задач электроразведки методом сопротивлений для сложнопостроенных сред. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. - Защищена 29.05.2003; Руководитель Шевнин, В. А. /Московский государственный университет. - Москва, 2003. -95 с.
10. Бобачев А.А., Модин И.Н., Перваго Е.В., Шевнин В.А. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред. М., 1996, 50 с. // Разведочная геофизика. Обзор. АОЗТ "Геоинформмарк". Выпуск 2. – 50 с.
11. Бобачев А. А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение. Разведка и охрана недр. 2005, N12, 52-54.
12. Бобачев А. А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А.. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации. Приборы и системы разведочной геофизики. 2006, N02, 14-17.
13. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности. Под ред. Шевнина В.А. и Модина И.Н. Изд. РУССО, 1999. 511 с.
14. Электропрофилирование с незаземленными рабочими линиями. — Л.: Недра, 1985 – 96 с.

Программное обеспечение:

- нелицензионне и свободного доступа

пакет программ Open Office, любые свободно распространяющиеся программы, требующие

ipri2win (создана на кафедре геофизики)

пакет ie2dp (создано на кафедре геофизики)

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

- реферативная база данных издательства Elsevier: www.sciencedirect.com

- Базы, реестры, справочники (свободный доступ, подписки)

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

- поисковая система научной информации www.scopus.com

- электронная база научных публикаций www.webofscience.com

<http://wiki.web.ru/> - энциклопедия по наукам о Земле геологического факультета МГУ.

<http://geoelectric.ru> – статьи по электротомографии.

<http://geoelectrical.com> – 2D инверсия данных электротомографии.

Материально-технического обеспечение:

Учебная аудитория с мультимедийным проектором.

Компьютерный класс отделения Геофизики.

8. Язык преподавания – русский.

9. Преподаватель: Ответственный за курс – доц. Бобачев А.А., преподаватель – доц. Бобачев А.А.

10. Разработчик программы – доц. Бобачев А.А.