

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Геоэлектрика
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра прикладной геофизики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: Д.А. Алексеев, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры прикладной геофизики 15.03.2021

## Аннотация

Курс посвящен вопросам теории, методики и практической интерпретации данных электромагнитных методов, применяемых в геофизической разведке полезных ископаемых, при исследовании внутренней структуры и геодинамических процессов, протекающих в земной коре и верхней мантии Земли. Курс содержит в себе обсуждение основных физических принципов электромагнитного зондирования, обзор методов и технологий электроразведки, элементы вычислительных задач в рамках обработки и интерпретации данных. Для успешного освоения курса слушателю желательно знать курс общей физики «Электродинамика» и владеть основами уравнений математической физики.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

Формирование базовых знаний в области электромагнитных методов, применяемых в геофизической разведке полезных ископаемых, при исследовании внутренней структуры и геодинамических процессов, протекающих в литосфере и верхней мантии Земли, а также при решении задач прогноза космической погоды (геомагнитно-индуцированных токов).

#### Задачи дисциплины

Дисциплина направлена на решение следующих задач:

1. Получение студентами опыта использования аппарата электродинамики для решения прикладных задач геоэлектрики (изучения электрических свойств горных пород *in situ*);
2. Ознакомление с основными подходами к решению прямых и обратных задач геоэлектрики;
3. Знакомство с методикой и аппаратурой, применяемых в электромагнитной геофизике.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов

физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

математические модели электромагнитных полей, применяемые в методах электромагнитной геофизики; принципы решения обратных задач электромагнитного зондирования; особенности применяемой аппаратуры и методики наблюдений; подходы к геологической интерпретации данных геоэлектрики.

уметь:

выбрать соответствующий электромагнитный метод для решения той или иной геолого-геофизической задачи; предложить метод интерпретации электромагнитных данных, в зависимости от используемого метода и особенностей данных; оценить надежность получаемых в результате интерпретации геоэлектрических моделей.

владеть:

математическим аппаратом электродинамики сплошных сред, использующимся при решении прикладных задач электромагнитного зондирования.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Электромагнитные свойства горных пород и геоэлектрические модели	2			2
2	Элементы теории электромагнитного поля	2			2
3	Поле постоянного тока и принципы зондирования методом сопротивлений	6	5		5
4	Принципы электромагнитного зондирования на переменном токе	3	5		3

5	Методы переменного тока с естественным источником поля. Магнитотеллурическое зондирование	2	5		3
Итого часов		15	15		15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Электромагнитные свойства горных пород и геоэлектрические модели

Электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость горных пород. Стандартные геоэлектрические модели. Размерность моделей (1D/2D/3D). Природа аномалий электропроводности земной коры.

##### 2. Элементы теории электромагнитного поля

Уравнения Максвелла. Модели электромагнитных (ЭМ) полей: стационарная, квазистационарная, волновая. Особенности поведения поля в зависимости от параметров геосреды.

##### 3. Поле постоянного тока и принципы зондирования методом сопротивлений

Уравнения поля постоянного тока. Закон Ома. Модели источника и среды. Точечный источник тока. Горизонтальный электрический и вертикальный магнитный диполи. Принципы решения краевых задач для электромагнитного поля. Уравнение Лапласа. Поле точечного источника в однородной, двухслойной и многослойной среде с горизонтальными границами. Принципы расчета постоянного электрического поля в 2D/3D моделях среды. Анализ поведения поля в различных моделях среды и источника. Понятие кажущегося сопротивления. Электроразведочные установки. Конфигурация установок, связь с глубиной. Симметричная и дипольная установки. Генераторы и измерительные устройства. Питающие и измерительные электроды. Влияние переходного сопротивления электродов. Многоэлектродные установки. Методы вертикального электрического зондирования и электрической томографии. Представление об обратных задачах в геофизике и электроразведке методами постоянного тока. Связь с геологической интерпретацией. Неустойчивость. Регуляризация решения. Принципы решения обратных задач. Методы Ньютона и градиентного спуска. Алгоритм решения обратной задачи вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Примеры интерпретации данных ВЭЗ и электротомографии.

##### 4. Принципы электромагнитного зондирования на переменном токе

Уравнения Максвелла в квазистационарном приближении во временной и частотной областях. Особенности поведения квазистационарных полей. Скин-эффект и толщина скин-слоя. Зондирование. Моделирование ЭМ полей в методах переменного тока. Поля электрического и магнитного диполей в однородном полупространстве, двухслойной и многослойной моделях среды с горизонтальными границами, особенности их поведения. Методы частотного и импульсного зондирования, связь между ними. Переход из частотной области во временную. Возможности и ограничения. Ближняя и дальняя зона источника (частотная область). Ранняя и поздняя стадия (временная область). Зондирующие установки и применяемая аппаратура. Особенности импульсного зондирования на акваториях. Примеры интерпретации данных.

##### 5. Методы переменного тока с естественным источником поля. Магнитотеллурическое зондирование

Методы магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования. Возможности и ограничения. Принципы обработки данных. Зондирующие установки и применяемая аппаратура. Особенности магнитотеллурического зондирования на акваториях. Примеры интерпретации данных. Естественные поля электрокинетической и электрохимической природы. Измерения и интерпретация.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Фейнмановские лекции по физике [Текст]. Вып. 6 : [учеб. пособие для вузов]. Электродинамика / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс ; под ред. Я. А. Смородинского. — 6-е изд. — М. : Едиториал УРСС, 2013. — 352 с.
2. Приповерхностная геофизика [Текст] / А. А. Спивак ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) - М.Ин-т динамики геосфер РАН : МФТИ,2010

### Дополнительная литература

1. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: ЛКИ, 2008.
2. Жданов М.С. Обратные задачи и теория регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007. 712 с.
3. Кауфман А.А., Андерсон Б.И. Принципы методов наземной и скважинной электроразведки. Тверь: Международная Ассоциация “АИС”, 2013. 488 с.
4. Кауфман А.А., Алексеев Д.А., Ористальо М. Принципы электромагнитных методов наземной геофизики / Тверь: Международная Ассоциация “АИС”. 2016. 558 с.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Подготовленные составителем программы презентации по всем темам (суммарно ~ 200 слайдов)  
Разработанные составителем программы расчетные модули в MATLAB для проведения семинарских занятий

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;

- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Общая и прикладная физика  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
кафедра прикладной геофизики  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** Д.А. Алексеев, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Геоэлектрика» обучающийся должен:



**знать:**

математические модели электромагнитных полей, применяемые в методах электромагнитной геофизики; принципы решения обратных задач электромагнитного зондирования; особенности применяемой аппаратуры и методики наблюдений; подходы к геологической интерпретации данных геоэлектрики.

**уметь:**

выбрать соответствующий электромагнитный метод для решения той или иной геолого-геофизической задачи; предложить метод интерпретации электромагнитных данных, в зависимости от используемого метода и особенностей данных; оценить надежность получаемых в результате интерпретации геоэлектрических моделей.

**владеть:**

математическим аппаратом электродинамики сплошных сред, использующимся при решении прикладных задач электромагнитного зондирования.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Пример задания контрольной работы: На горизонтальной поверхности однородной проводящей среды (полупространства) с удельным сопротивлением  $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  имеется два точечных разнополярных электрода (А и В), расположенных на расстоянии 100 м друг от друга вдоль оси  $x$ , к которым подключен генератор постоянного тока силой 1 А. Определить, на каком предельном расстоянии от центра АВ можно разместить MN длиной 20 м, если чувствительность регистрирующего устройства составляет 1 мВ. Рассмотреть два случая: MN параллельно АВ; MN перпендикулярно АВ

Пример задачи домашнего задания: Определить глубинность зондирования с использованием магнитотеллурического метода, если известно, что максимальный измеряемый период вариаций составляет 100 с, а усредненное сопротивление среды равно  $1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

**4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень контрольных вопросов:

1. Перечислить электромагнитные свойства горных пород, дать их краткую характеристику
2. Привести классификацию методов электроразведки и области их наиболее эффективного применения;
3. Принципы метода сопротивлений и основные закономерности поведения поля постоянного тока в проводящей среде.
4. Основные свойства тензора магнитотеллурического импеданса в 1D, 2D и 3D-моделях геосреды.
5. Принципы метода зондирования становлением поля (ЗС). Используемые установки, методика измерений.

Примеры контрольных заданий:

1. Найти интегральную проводимость трехслойной проводящей среды, если даны значения мощности и удельного сопротивления каждого слоя
2. Оценить напряженность электрического поля постоянного тока, измеряемого с использованием симметричной четырехэлектродной установки AMNB на поверхности однородной среды с удельным сопротивлением  $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , если известно, что  $AB=200 \text{ м}$ ,  $MN=20 \text{ м}$ , сила тока в АВ составляет 10 А.
3. Оценить максимально допустимый уровень случайного шума при измерении поздней стадии переходного процесса скорости изменения вертикальной составляющей магнитной индукции, создаваемой вертикальным магнитным диполем на поверхности однородной среды с сопротивлением  $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  в точке  $r=0$ , если максимальное измеряемое время становления составляет 1 с.
4. Оценить диапазон частот и расстояний, соответствующих условию дальней зоны источника, если известно, что среда имеет усредненное удельное сопротивление  $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

5. Оценить максимально допустимую глубину водоема, по поверхности которого буксируется установка импульсного зондирования, если считать, что для надежного определения электрических параметров толщи донных осадков мощностью 20 м и сопротивлением  $2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , их интегральная проводимость должна составлять не менее 20% от проводимости вышележащей водной толщи.

#### Критерии оценивания

Оценка "отлично" (10 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (9 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (8 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка "хорошо" (6 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка "хорошо" (5 баллов) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка "удовлетворительно" (4 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка "удовлетворительно" (3 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка "неудовлетворительно" (2 балла) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка "неудовлетворительно" (1 балл) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

#### 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Дифференцированный зачёт проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.