

## **ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Теория электромагнитных зондирований**

**Рекомендуется для направления подготовки  
020700 «Геология», магистерские программы  
«Глубинная геофизика», «Малоглубинная геофизика»**

**Квалификация (степень) выпускника: магистр**

## **DISCIPLINE PLAN**

### **Theory of Electromagnetic Soundings**

**Recommended for training programme**

**020700 «Geology», master programs**

**«Deep Exploration Geophysics», «Near Surface Geophysics»**

Qualification (degree) of the graduate: Master

## **1. Цели и задачи освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины «Теория электромагнитных зондирований» является получение знаний о постановке и методах решения основных задач индукционных электромагнитных зондирований, а также выработка понимания закономерностей поведения электромагнитного поля в рамках этих задач. Эти фундаментальные знания необходимы для успешного применения методов анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований, также рассматриваемых в рамках дисциплины.

## **1. Goals and objectives of study**

The goals of study of the discipline «Theory of electromagnetic soundings» are gaining knowledge about statement and methods for solution of basic problems of induction electromagnetic soundings, as well as understanding of electromagnetic field structure and variations in the framework of these problems. This fundamental knowledge is necessary for successful application of methods of electromagnetic sounding data analysis and interpretation, which are also considered within the discipline.

## **2. Место дисциплины в структуре ООП**

Дисциплина «Теория электромагнитных зондирований» читается в рамках магистерских программ «Глубинная геофизика» и «Малоглубинная геофизика». Дисциплина базируется на знаниях, полученных при изучении дисциплин из базовой и вариативной частей ООП бакалавриата: блока общенаучной подготовки (математические дисциплины «Математический анализ», «Линейная алгебра», «Дифференциальные уравнения», «Теория вероятности и математическая статистика», «Вычислительная математика») и блока профильной подготовки (геофизические дисциплины «Теория геофизических полей», «Электроразведка», «Некорректные задачи геофизики», «Интерпретация данных электроразведки»). Освоение дисциплины «Теория электромагнитных зондирований» необходимо для дальнейшего изучения дисциплин магистерских программ «Глубинная геофизика» и «Малоглубинная геофизика».

## **2. Discipline as a part of the curriculum**

The discipline «Theory of electromagnetic soundings» is studied in the framework of masters programs «Deep Exploration Geophysics» and «Near-Surface Geophysics». The discipline is based on knowledge, obtained while studying the disciplines from fundamental and optional parts of the bachelors BEP: from the block of general science training (mathematical disciplines «Mathematical analysis», «Linear algebra», «Differential equations», «Probability theory and mathematical statistics», «Computational mathematics») and from the block of profile training (geophysical disciplines «Theory of geophysical fields», «Electrical prospecting», «Ill-posed problems in geophysics», «Interpretation of electrical prospecting data»). Study of the discipline «Theory of electromagnetic soundings» is necessary for further study of the disciplines of the master programs «Deep Exploration Geophysics» and «Near-Surface Geophysics».

## **3. Требования к результатам освоения дисциплины**

В процессе изучения дисциплины «Теория электромагнитных зондирований» формируются элементы следующих профессиональных компетенций:

- способность глубоко осмысливать и формировать диагностические решения проблем геологии путем интеграции фундаментальных разделов геофизики и специализированных геологических знаний (М-ПК-1);

- способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области геофизики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования, информационных технологий, с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (М-ПК-2);

- способность использовать углубленные специализированные профессиональные теоретические и практические знания для проведения геофизических исследований (М-ПК-4);

- способность свободно и творчески пользоваться современными методами обработки и интерпретации комплексной геофизической информации для решения научных и практических задач, в том числе находящихся за пределами непосредственной сферы деятельности (М-ПК-6);

- готовность к проектированию комплексных научно-исследовательских и научно-производственных работ при решении геофизических задач (М-ПК-10).

В результате освоения дисциплины «Теория электромагнитных зондирований» обучающийся должен:

**знать** теоретические основы решения прямых одномерных задач электромагнитных зондирований, а также многомерных задач магнитотеллурических зондирований; основные закономерности распределения электромагнитного поля в рамках этих задач; основные термины на английском языке;

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

**владеть** методами анализа и интерпретации данных электромагнитных зондирований.

### 3. Discipline requirements

The result of studying the discipline «Theory of electromagnetic soundings» is the formation of the following professional competences:

- the ability to deeply comprehend and generate diagnostic solutions to geological problems by integrating the fundamentals of geophysics and specific geological knowledge (M-PC-1);

- the ability to independently set specific objectives in the field of scientific research in geophysics, and solve them using modern facilities, equipment, information technologies, most recent experience of domestic and foreign researchers (M-PC-2);

- the ability to use advanced specialized professional theoretical and practical knowledge to carry out geophysical research (M-PC-4);

- the ability to freely and creatively use modern methods of processing and interpretation of complex geophysical data in order to solve scientific and practical problems, including those out of the professional scope (M-PC-6);

- readiness to design complex research and scientific-production projects for solving geophysical problems (M-PC-10).

As a result of studying the discipline «Theory of electromagnetic soundings» the student must:

**know** theoretical basics of the solution of forward one-dimensional problems of electromagnetic soundings, as well as multi-dimensional problems of magnetotelluric soundings; main features of electromagnetic field structure in the framework of these problems; principal terms in English;

**be able to** select optimal methods for electromagnetic sounding data interpretation; construct prior resistivity models; evaluate sensitivity of electromagnetic soundings to different parameters of resistivity model;

**master** methods of electromagnetic sounding data analysis and interpretation.

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины «Теория электромагнитных зондирований» составляет 3 зачётные единицы или 108 часов, в том числе аудиторной нагрузки 28 часов (лекции 14 часов и семинары 14 часов) и самостоятельной работы студентов 80 часов.

##### 4.1 Структура дисциплины

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов (трудоемкость в часах)					Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				лекции	семинары	практические занятия	лабораторные работы	самостоятельная работа	
1	Введение	9	1	2					
2	Фундаментальная модель индукционного зондирования	9	2-3	2	2			10	
3	Магнитовариационное зондирование	9	4		2			10	Контрольная работа
4	МТ зондирование горизонтально-однородных сред	9	5	2				10	
5	МТ зондирование горизонтально-неоднородных сред	9	6		2			10	
6	Анализ МТ данных	9	7-8	2	2			10	Контрольная работа
7	Интерпретация МТ данных	9	9-10	2	2			10	
8	Поле гармонического вертикального магнитного диполя в горизонтально-однородной среде	9	11-12	2	2			10	
9	Становление поля вертикального магнитного диполя в горизонтально-однородной среде	9	13-14	2	2			10	Контрольная работа
Промежуточная аттестация		9							Экзамен
Всего: 3 ЗЕ или 108 часов				14	12			80	

##### 4.2 Содержание 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 возбудителей поля
- 2.2. Пространственные спектры электромагнитного поля
- 2.3. Теорема Липской-Ваньяна
- 2.4. Вертикальное электрическое поле в земле
- 2.5. 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 (МВ) зондирование**

- 3.1. Разделение геомагнитного поля на внешнюю и внутреннюю части
- 3.2. Глобальное МВ зондирование: первые опыты
- 3.3. Построение и интерпретация кривой глобального МВ зондирования
- 3.4. МВ зондирование способами отношения компонент и пространственных производных
- 3.5. Современное состояние глубинных МВ зондирований

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 МВ зондирования: глобальный, основанный на анализе пространственных спектров магнитного поля, измеренного на всей земной поверхности, а также отношения компонент (зональный) и пространственных производных (градиентный), использующие компоненты поля и их пространственные производные в одной точке земной поверхности. Дается представление о современном состоянии обсерваторских и спутниковых МВ исследований.

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

- 4.1. Поле плоской волны, задача Тихонова-Каньяра
- 4.2. Кривые МТ зондирования и их асимптоты
- 4.3. Трансформация Ниблетта
- 4.4. Решение одномерной обратной задачи МТ зондирования

В четвертом разделе начинается рассмотрение теории метода МТ зондирования, 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 МТ зондирования для горизонтально-слоистой среды. Как основная характеристика горизонтально-однородной среды вводится импеданс Тихонова-Каньяра. Анализируются кривые МТ зондирования, способы их автоматической трансформации, а также интерпретации с учетом априорной информации.

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

- 5.1. Горизонтально-неоднородная геоэлектрическая модель, тензор импеданса
- 5.2. Разделение поля на нормальную и аномальную части, тензоры Грина
- 5.3. Две поляризации нормального поля

#### 5.4. Линейные связи между компонентами МТ поля и их особенности

Вводятся в рассмотрение горизонтально-неоднородная модель Земли и ее основная геоэлектрическая характеристика – тензор импеданса. На основе анализа модели с неоднородностью в горизонтально-слоистой среде, с привлечением теории метода интегральных уравнений, показывается, что линейные связи между компонентами МТ поля выводятся из уравнений Максвелла. Анализируются свойства тензора импеданса в одномерной, двухмерной и трехмерной моделях среды.

#### **(6). Анализ МТ и 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. Матрица Визе-Паркинсона
- 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. Программы решения прямых и обратных задач
- 7.4. 2D интерпретация, принцип информационной дополненности
- 7.5. 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
- 8.6. Особенности электромагнитного поля при гальваническом возбуждении

В этом разделе, на основе фундаментальной модели индукционного зондирования, выводится решение задачи о поле гармонического 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. Проводится сравнение основных особенностей полей при индукционном и гальваническом возбуждении.

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

- 9.1. Спектральный метод расчета неустановившегося поля
- 9.2. О расчете поля для двухпетлевой установки
- 9.3. Становление поля ВМД в однородном полупространстве
- 9.4. Анализ становления поля ВМД в дальней и ближней зонах
- 9.5. Кривые кажущейся проводимости

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

### 4. The structure and content of the discipline

Overall study of the discipline «Theory of electromagnetic soundings» content is 3 credits or 108 hours, including 28 hours of classes (lectures 14 hours plus seminars 14 hours) and 80 hours of independent work of students.

#### 4.1 Discipline structure

Number	Section of the discipline	Semester	Week of the semester	Kinds of study activities, including independent work of students (labor content in hours)					Forms of progress control (in weeks of semester) Form of intermediate assessment (in semesters)
				lectures	seminars	practical work	laboratory work	independent work	
1	Introduction	9	1	2					
2	Fundamental model of induction sounding	9	2-3	2	2			10	
3	Magnetovariational sounding	9	4		2			10	Written test
4	MT sounding of horizontally-stratified medium	9	5	2				10	
5	MT sounding of horizontally inhomogeneous medium	9	6		2			10	
6	MT data analysis	9	7-8	2	2			10	Written test
7	MT data interpretation	9	9-10	2	2			10	
8	Harmonic field of vertical magnetic dipole in horizontally-stratified medium	9	11-12	2	2			10	
9	Transient field of vertical magnetic dipole in horizontally-stratified	9	13-14	2	2			10	Written test



medium								
Intermediate assessment	9							Examination
In total: 3 credits or 108 hours			14	14			80	

## 4.2 Discipline contents

### (1). Introduction

- 1.1. Main scientific schools on electromagnetic soundings
- 1.2. Recommended literature (monographs, periodical publications) and Internet resources
- 1.3. Some formulae from the theory of electromagnetic field

The section includes information, necessary for the understanding of lectures and for the independent work during semester. The history of development of electromagnetic soundings is considered, main scientific schools are characterized. Links to the sources of additional information are provided. Elements of the field theory, required for further work, are reminded.

### (2). Fundamental model of induction sounding

- 2.1. Models of the medium and field generators
- 2.2. Spatial spectra of electromagnetic field
- 2.3. Lipskaya-Vanyan theorem
- 2.4. Vertical electric field in the ground
- 2.5. Spectral impedance and ways of its definition

In this section we consider the statement of the fundamental problem, forming the background of all induction sounding methods theory – about the field, created in horizontally-stratified medium by the arbitrary system of closed currents in the air. This problem is solved using spatial spectra of field components. Using different ratios of field components spectra, we define spectral impedance, connected with the parameters of layered medium.

### (3). Magnetovariational (MV) sounding

- 3.1. Separation of geomagnetic field to external and internal parts
- 3.2. Global MV sounding: first experiments
- 3.3. Construction and interpretation of global MV sounding curve
- 3.4. Component ratio and spatial derivatives methods of MV sounding
- 3.5. Modern state of MV soundings

The section is dedicated to a method of the Earth's mantle sounding using long-period variations of the Earth's magnetic field. A problem of field separation into two parts, connected with magnetosphere-ionosphere current system and with telluric currents in the Earth, is considered. Several ways to perform MV sounding are analyzed, they are: global, based on computation of spatial spectra of magnetic field, measured in the Earth's surface; and also component ratio (zonal) method and spatial derivatives (gradient) method, using field components and their spatial derivatives at one point of the Earth's surface. Modern state of observatory and satellite MV studies is considered.

### (4). Magnetotelluric (MT) sounding of horizontally-stratified medium

- 4.1. Plane wave field, Tikhonov-Cagniard problem
- 4.2. MT sounding curves and their asymptotes
- 4.3. Niblett transformation
- 4.4. Solution of one-dimensional inverse problem of MT soundings

In the fourth section we begin to study the theory of MT sounding method, which is based on usage of magnetic and electric components of the Earth's alternate field. From the fundamental model of induction sounding, for the particular case of plane-wave field, we obtain the solution of the forward problem of MT sounding in case of horizontally-layered medium. Tikhonov-Cagniard impedance is introduced as the main characteristic of horizontally-layered medium. MT sounding curves are analyzed, as well as ways of their automatic transformation and interpretation using prior information.

## **(5). MT sounding of horizontally inhomogeneous medium**

- 5.1. Horizontally inhomogeneous resistivity model, impedance tensor
- 5.2. Field separation into normal and anomalous parts, Green's tensors
- 5.3. Two polarizations of the normal field
- 5.4. Linear relationships between MT field components and their features

Horizontally inhomogeneous model of the Earth is introduced together with its main characteristic – impedance tensor. Analyzing a model with inhomogeneity in the horizontally-layered background, and using integral equations method theory, we show that linear relationships between MT field components can be derived from the fundamental Maxwell's equations. The behavior of impedance tensor in one-, two- and three-dimensional models is considered.

## **(6). MT data analysis**

- 6.1. Polar diagrams and invariants of impedance tensor
- 6.2. Principal values and principal directions of impedance tensor
- 6.3. Methods for the separation of local and regional effects
- 6.4. Wiese-Parkinson matrix
- 6.5. Two-point MT matrixes

The section is dedicated to methods for MT data analysis, which allow revealing major conductivity anomalies, determining their strike and elongation, evaluating and suppressing the influence of near-surface inhomogeneities. We derive and analyze formulae defining principle values and directions of impedance tensor, as well as its regional component. Besides impedance tensor, we consider Wiese-Parkinson matrix and horizontal magnetic tensor, which are determined using magnetic field components only.

## **(7). MT data interpretation**

- 7.1. Solution of forward 2D and 3D MT problems
- 7.2. Solution of inverse 2D and 3D MT problems
- 7.3. Programs for the solution of forward and inverse problems
- 7.4. 2D interpretation, principle of informational complementarity
- 7.5. Modern strategy of MT data interpretation

We briefly discuss the basics of modern numerical modeling methods and consider the methods and software for the solution of two- and three-dimensional forward and inverse MT problems. Features of two polarizations, into which MT field split in 2D medium, are reviewed. The necessity to use both polarizations for the interpretation is shown, ways of their parallel and successive inversion are compared. In conclusion, the graph of MT data analysis and interpretation is considered with application to mediums of different dimensionality.

## **(8). Harmonic field of vertical magnetic dipole in horizontally-stratified medium**

- 8.1. Statement of the problem, spatial spectra of field components
- 8.2. Transition from spatial spectra to field components
- 8.3. The field of vertical magnetic dipole (VMD) in the homogeneous half-space (HHS)
- 8.4. Method of sounding in the far zone of VMD
- 8.5. Method of sounding in the near zone of VMD
- 8.6. Features of electromagnetic field in case of galvanic excitation

In this section, on the basis of the fundamental model of induction sounding, we derive the solution of the problem on estimation of the harmonic vertical magnetic dipole field, used in methods of controlled source sounding. We consider the question of numerical evaluation of field components, which is reduced to integral transforms calculation using linear filtering method. Then we analyze field structure in case of homogeneous half-space. Two methods of sounding in the field of vertical magnetic dipole are considered: frequency sounding in far zone and geometrical sounding in near zone. Main features of the fields created by inductive and galvanic excitation are compared.

## **(9). Transient field of horizontal magnetic dipole in horizontally-stratified medium**

9.1. Spectral method for transient field calculation

9.2. Two-loop array field computation

9.3. Transient field of the VMD in the homogeneous half-space

9.4. Analysis of the VMD transient field in far and near zones

9.5. Apparent conductance curves

The last section is dedicated to the theory of time-domain sounding method. We consider method for transient field calculation, based on Fourier transform of the solution, obtained in frequency domain. Then we discuss the principles of field computation for widely used two-loop array with coincident and separated loops. Field on the surface of the homogeneous half-space is analyzed. Modifications of time-domain method for far zone and near zone are considered. The way to construct apparent conductance curves using near zone field data is discussed.

## **5. Рекомендуемые технологии**

При реализации программы дисциплины «Теория электромагнитных зондирований» используются различные образовательные технологии. Аудиторные занятия (28 часов) включают лекции, в том числе интерактивные и с демонстрацией слайдов, а также семинары. Самостоятельная работа студентов (44 часа) включает повторение материала лекций, подготовку контрольным работам, а также подготовку к экзамену.

## **5. Recommended methodology**

Different educational technologies are used during the implementation of «Theory of electromagnetic sounding» discipline program. Class works (28 hours) include lectures, some of which are interactive or with slides demonstration, and several seminars. Independent work of students (80 hours) includes revision of lecture materials, preparation to written tests and preparation to the examination.

## **6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины**

Для стимулирования самостоятельной работы студентов в течение семестра, проводятся три небольшие письменные контрольные работы. Успешно написавшие контрольные работы студенты допускаются к экзамену.

Список вопросов к экзамену:

1. Фундаментальная модель индукционного зондирования, пространственные спектры.
2. Теорема Липской-Ваньяна.
3. Вертикальное электрическое поле в земле.
4. Спектральный импеданс и способы его определения.
5. Разделение геомагнитного поля на внешнюю и внутреннюю части.
6. Глобальное МВ зондирование: первые опыты, интерпретация кривой зондирования.
7. МВ зондирование способами отношения компонент и пространственных производных. Современное состояние глубинных МВ зондирований.
8. Плоская волна, задача Тихонова-Каньяра. Кривые МТ зондирования, их асимптоты.
9. Трансформация Ниблетта.
10. Решение одномерной обратной задачи МТ зондирования.
11. Горизонтально-неоднородная геоэлектрическая модель. Разделение поля на нормальную и аномальную части, тензоры Грина.
12. Две поляризации нормального поля. Линейные связи между компонентами МТ поля и их особенности.
13. Полярные диаграммы и инварианты тензора импеданса.
14. Главные значения и главные направления тензора импеданса.
15. Методы разделения локальных и региональных эффектов.
16. Матрица Визе-Паркинсона.

17. Двухточечные МТ матрицы.
18. Решение прямых 2D и 3D задач МТЗ.
19. Решение обратных 2D и 3D задач МТЗ.
20. 2D интерпретация МТ данных, принцип информационной дополнительности.
21. Современная стратегия интерпретации МТ данных.
22. Постановка задачи о поле ВМД в ГСС, пространственные спектры компонент поля.  
Переход от пространственных спектров к компонентам поля.
23. Поле гармонического ВМД в однородном полупространстве.
24. Методы зондирования в дальней и ближней зоне гармонического ВМД.
25. Особенности электромагнитного поля при гальваническом возбуждении.
26. Спектральный метод расчета неустановившегося поля.
27. О расчете становления поля двухпетлевой установки.
28. Становление поля ВМД в однородном полупространстве.
29. Анализ становления поля ВМД в дальней и ближней зонах.
30. Кривые кажущейся проводимости.

## **6. Marking for current performance control and interim assessment during and at the end of the course**

For the stimulation of the independent work of students during the semester, three small written tests are conducted. Those who successfully pass these tests are allowed to take the examination.

The list of questions for the examination:

1. Fundamental model of induction sounding, spatial spectra.
2. Lipskaya-Vanyan theorem.
3. Vertical electric field in the ground.
4. Spectral impedance and ways of its definition.
5. Separation of geomagnetic field into external and internal parts.
6. Global MV sounding: first experiments, interpretation of sounding curve.
7. MV soundings by means of components ratio and spatial derivatives methods. Modern state of deep MV studies.
8. Plane wave, Tikhonov-Cagniard problem. MT sounding curves, their asymptotes.
9. Niblett transformation.
10. Solution of one-dimensional inverse problem of MT sounding.
11. Horizontally-inhomogeneous resistivity model. Field separation into normal and anomalous parts, Green's tensors.
12. Two polarizations of normal field. Linear relations between MT field components and their features.
13. Polar diagrams and invariants of impedance tensor.
14. Principal values and principal directions of impedance tensor.
15. Methods for local and regional effects separation.
16. Weise-Parkinson matrix.
17. Two-point MT matrixes.
18. Solution of forward 2D and 3D MT problems.
19. Solution of inverse 2D and 3D MT problems.
20. 2D interpretation of MT data, principle of informational complementarity.
21. Modern strategy of MT data interpretation.
22. Statement of the problem of VMD field in homogeneous half-space, spatial spectra of field components. Transition from spatial spectra to field components.
23. Field of a harmonic VMD in a homogeneous half-space.
24. Methods of sounding in far and near zones of a harmonic VMD.
25. Features of electromagnetic field in case of galvanic excitation.
26. Spectral method of transient field calculation.
27. Calculation of two-loop array transient field.
28. Transient field of a VMD in a homogeneous half-space.

29. Analysis of VMD transient field in far and near zones.
30. Apparent conductance curves.

## **7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **7. Methodological and informational support**

а) основная литература:

а) primary list of books:

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.

б) дополнительная литература:

б) secondary list of books:

4. Жданов М.С. Геофизическая электромагнитная теория и методы. М.: Научный мир, 2012. 680 с.
5. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
6. 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.
7. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.
8. Сидоров В.А. Импульсная индуктивная электроразведка. М.: Недра, 1985. 192 с.
9. Светов Б.С. Теория, методика и интерпретация результатов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 256 с.
10. Кауфман А.А. Введение в теорию геофизических методов. Часть 2: электромагнитные поля. М.: Недра, 2000. 483 с.
11. 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.
12. Электромагнитные исследования земных недр. Под ред. Спичака В.В. М.: Научный мир, 2005. 245 с.

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Для материально-технического обеспечения дисциплины «Теория электромагнитных зондирований» используются лекционные аудитории и библиотека геологического факультета МГУ.

## **8. Necessary facilities and equipment**

For the material and technical support of the discipline «Theory of electromagnetic soundings» lecture rooms and the library of the Faculty of geology of MSU are used.

## **9. 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, даётся информация о методах анализа и интерпретации данных.

## **9. Discipline content (annotation)**

The fundamental model of induction electromagnetic sounding is considered. It includes horizontally-layered lower half-space and resistive upper half-space, containing a system of

closed foreign currents. As particular cases of this problem, we obtain and solve one-dimensional problems of sounding methods: deep magnetovariational (MV), magnetotelluric (MT), controlled-source frequency domain (FDEM) and time-domain (TDEM). The main features and regularities of electromagnetic field in the framework of these problems are considered. With regard to MT sounding method, two- and three-dimensional problems are considered, and methods for data analysis and interpretation are discussed.

#### **10. Учебно-методические рекомендации для обеспечения самостоятельной работы студентов**

Темы для самостоятельной работы студентов:

- Магнитотеллурические функции отклика;
- Главные значения и главные направления тензора импеданса;
- Разделение локальных и региональных магнитотеллурических эффектов;
- Магнитовариационные функции отклика;
- Две классические модели теории искажений;
- Модели геоэлектрических структур в осадочном чехле;
- Модели глубинных геоэлектрических структур;
- Модели глубинных разломов;
- Постановка обратной задачи;
- Интерпретационная модель;
- Стратегия инверсии.

#### **10. Educational and methodological recommendations for self-study**

Topics for independent work of students:

- Magnetotelluric response functions;
- Principal values and principal directions of impedance tensor;
- Separation of local and regional magnetotelluric effects;
- Magnetovariational response functions;
- Two classic models from the distortion theory;
- Models of geoelectric structure in a sedimentary cover;
- Models of deep geoelectric structures;
- Models of deep faults;
- Statement of the inverse problem;
- Interpretational model;
- Inversion strategy.

#### **Разработчики:**

Геологический факультет МГУ профессор  
8(495)939-4912, 8(916)212-6911, berd@mtu-net.ru

М.Н. Бердичевский

Геологический факультет МГУ доцент  
8(495)939-4912, 8(905)703-7950, pavel\_pushkarev@list.ru

П.Ю. Пушкарев

#### **Эксперты:**

Геологический факультет МГУ профессор

И.Н. Модин

ЦГЭМИ ИФЗ РАН

директор

Ив.М. Варенцов

Программа одобрена на заседании Ученого совета Геологического факультета МГУ (протокол №\_\_\_\_\_ от\_\_\_\_\_).

#### **Developers:**

Geological faculty of MSU (place of work)	Professor (position)	M.N. Berdichevsky (initials, surname)
Office phone number, mobile phone number, e-mail: 8(495)939-4912, 8(916)212-6911, berd@mtu-net.ru		

Geological faculty of MSU (place of work)	Associate professor (position)	P.Yu. Pushkarev (initials, surname)
Office phone number, mobile phone number, e-mail: 8(495)939-4912, 8(905)703-7950, pavel_pushkarev@list.ru		

**Experts:**

Geological faculty of MSU (place of work)	Professor (position)	I.N. Modin (initials, surname)
--	-------------------------	-----------------------------------

GEMRC IPE RAS (place of work)	Director (position)	Iv.M. Varentsov (initials, surname)
----------------------------------	------------------------	--

The program has been approved by Academic Council of Faculty of Geology of MSU (protocol No.\_\_\_\_\_ from\_\_\_\_\_).