

Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Пушкарев П.Ю.

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ ЗЕМЛИ

*Учебное пособие по курсу лекций
для аспирантов первого года
обучения по направлению
«Науки о Земле»*



Петронавловск-Камчатский

Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения
Российской академии наук

Пушкарев П.Ю.

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ЗОНДИРОВАНИЙ ЗЕМЛИ

*Учебное пособие по курсу лекций
для аспирантов первого года
обучения по направлению
«Науки о Земле»*

Петропавловск-Камчатский
Издательство «Новая книга»
2022

УДК 550.837

ББК 26.213

П88

Рецензенты:

Белявский В.В., д.т.н., главный научный сотрудник ЦГЭМИ ИФЗ РАН

Персова М.Г., д.т.н., профессор кафедры прикладной математики НГТУ

Пушкарев П.Ю. Прямые и обратные задачи электромагнитных зондирований Земли. Учебное пособие. – Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2022. – 144 с.

В книге рассмотрены основы теории геофизических полей, особенности электромагнитного поля, прямые задачи о плоском поле в одномерной и двухмерной среде, основы теории обратных задач, фундаментальная модель индукционного зондирования, вопросы теории и интерпретации данных методов зондирования: магнитотеллурического, глубинного магнитовариационного, а также с контролируемым источником в частотной и временной области.

Рекомендовано Учёным советом НИГТЦ ДВО РАН в качестве учебного пособия по курсу лекций для аспирантов первого года обучения по направлению «Науки о Земле».

Печатается по решению Учёного совета НИГТЦ ДВО РАН.

ISBN 978-5-97448-10-0

© П. Ю. Пушкарев, 2022

© НИГТЦ ДВО РАН, 2022

Содержание

Содержание	2
Предисловие.....	4
Основные обозначения	6
Лекция 1. Методы электромагнитного зондирования.	9
Лекция 2. Алгебра физических величин.	13
Лекция 3. Дифференцирование физических полей.....	23
Лекция 4. Интегрирование физических полей.....	29
Лекция 5. Уравнения постоянного поля.....	33
Лекция 6. Постоянные электрическое и магнитное поля.	42
Лекция 7. Переменное электромагнитное поле.....	51
Лекция 8. Плоское поле в одномерной среде. Аналитическое решение.....	59
Лекция 9. Плоское поле в двухмерной среде. Метод конечных разностей.	64
Лекция 10. Обратные задачи. Теория регуляризации.	76
Лекция 11. Фундаментальная модель индукционного зондирования.....	86
Лекция 12. Глубинное магнитовариационное зондирование.....	93
Лекция 13. Магнитотеллурическое зондирование слоистых сред.....	99
Лекция 14. Анализ магнитотеллурических данных.	107
Лекция 15. Интерпретация магнитотеллурических данных.....	117
Лекция 16. Общий граф магнитотеллурических исследований.....	123
Лекция 17. Поле гармонического магнитного диполя в слоистой среде.	128
Лекция 18. Становление поля магнитного диполя в слоистой среде.	135
Контрольные вопросы.....	140
Литература	142

Предисловие

Настоящее учебное пособие подготовлено для аспирантов первого года обучения ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН по направлению «Науки о Земле».

Учебное пособие посвящено теории геофизических методов электромагнитного зондирования Земли. Эти методы применяются при решении целого ряда геологических задач, таких как поиск и разведка месторождений углеводородов, твёрдых полезных ископаемых, геотермальных ресурсов, глубинные исследования сейсмоактивных и вулканических зон и т.д.

По измеренным на земной поверхности значениям естественного или искусственного электромагнитного поля методы зондирования позволяют оценивать распределение электропроводности в земных недрах. Это свойство чувствительно к составу горных пород, их насыщенностью водой, нефтью или газом, к включениям электропроводящих минералов, к плавлению горных пород и другим факторам.

В основе оценки возможностей электромагнитных методов геофизики лежат прямые задачи, то есть задачи определения электромагнитного поля над различными моделями распределения электропроводности в Земле или геоэлектрическими моделями.

В основе интерпретации данных электромагнитных зондирований лежат обратные задачи, решение которых позволяет по наблюдаемым значениям поля получать геоэлектрические модели среды. Решение обратных задач неоднозначно и неустойчиво, но эта проблема решается путём привлечения дополнительной геолого-геофизической информации.

В настоящем учебном пособии вначале приводятся необходимые математические основы, а затем рассматриваются прямые и обратные задачи методов электромагнитного зондирования для различных видов возбудителей поля и геоэлектрических моделей среды.

Учебное пособие состоит из 18 лекций. В первой, вводной, кратко рассмотрена сущность методов электромагнитного зондирования. Лекции 2-4 посвящены математическому описанию векторных физических полей, их дифференцированию и интегрированию. В лекции 5 приводятся общие уравнения постоянного поля, а в лекциях 6 и 7 рассматриваются основные особенности вначале постоянных электрического и магнитного полей, а затем переменного электромагнитного поля.

В лекции 8 выводится аналитическое решение простой, но важной для геофизики прямой задачи о плоском электромагнитном поле в горизонтально-слоистой среде. В 9-й лекции рассматривается более сложная задача о плоском поле в двухмерно-неоднородной среде, она решается численным методом конечных разностей. Лекция 10 даёт представление об обратных задачах геофизики и подходах к их решению.

В 11-й лекции рассматривается фундаментальная модель индукционного зондирования, в которой поле имеет произвольную структуру, эта теория в дальнейшем служит основой для прямых задач методов электромагнитного зондирования с разными видами возбудителей поля. В лекции 12 на этой основе излагается идея метода магнитовариационного зондирования, использующего геомагнитные вариации для изучения глубоких горизонтов литосферы.

Лекции 13-15 посвящены методу магнитотеллурического зондирования, использующего плосковолновое естественное поле космической и грозовой природы. Вначале рассматривается методика изучения горизонтально-однородных сред, а далее – анализа магнитотеллурических данных и решения обратных задач в горизонтально-неоднородных средах.

В лекции 16 представлен общий граф магнитотеллурических исследований, включающий проведение наблюдений, обработку сигналов, анализ и инверсию данных, а также геологическое истолкование результатов.

В двух последних лекциях, 17-й и 18-й, рассматривается теория методов зондирования с использованием контролируемых источников в частотной области (гармоническим полем) и во временной области (становлением поля).

В конце приводится список литературы, который может использоваться для дальнейшего более глубокого изучения теории и практики применения методов электромагнитного зондирования.

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую признательность своим учителям, профессорам МГУ имени М.В. Ломоносова: М.Н. Бердичевскому, В.И. Дмитриеву, А.А. Булычеву и А.Г. Яковлеву. Ими были созданы учебные курсы для студентов-геофизиков геологического факультета МГУ, которые в значительной степени легли в основу настоящего учебного пособия.

Также автор хотел бы поблагодарить директора НИГТЦ ДВО РАН Р.И. Пашкевича, по инициативе которого было подготовлено данное учебное пособие.