

Б. С. Светов

**ОСНОВЫ
ГЕОЭЛЕКТРИКИ**



URSS

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ
Центр геоэлектромагнитных исследований

Б. С. Светов

ОСНОВЫ ГЕОЭЛЕКТРИКИ



URSS
МОСКВА



*Настоящее издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект № 07-05-07045)*

Светов Борис Сергеевич

Основы геоэлектрики. — М.: Издательство ЛКИ, 2008. — 656 с., цв. вкл.

В книге рассматриваются теоретические основы геоэлектрики — геофизического метода исследования строения Земли и происходящих в ней процессов, основанного на изучении электромагнитных (ЭМ) полей искусственного и естественного происхождения. В краткой форме анализируются основные уравнения электродинамики сплошных сред и методы их решения, а также главные теоремы и принципы электродинамики. Попутно рассматриваются важные для электродинамики и геоэлектрики вопросы о представлении ЭМ поля в виде суперпозиции потенциального и индуцированного полей, об эквивалентных возбудителях ЭМ поля, о сторонних полях, создающих ЭМ поле и др. Выводятся условия, при которых векторные уравнения электродинамики скаляризуются, т. е. сводятся к двум отдельным скалярным уравнениям в частных производных второго порядка относительно потенциалов электрического и магнитного типов, а затем формулируются условия, при которых в полученных скалярных уравнениях разделяются переменные. Находятся и анализируются с геофизических позиций аналитические решения электродинамических задач в стационарном и переменном ЭМ поле для основных моделей сред: горизонтально и цилиндрически слоистой, локальных проводящих объектов сферической, цилиндрической, сфероидальной формы, нарушений горизонтальной однородности среды в форме наклонного контакта, параболаида вращения и идеально проводящей полуплоскости. В задачах рассматриваются изотропные и анизотропные среды и типовые возбудители ЭМ поля. Даются интегральные представления решений через функции и аффиноры Грина и приводятся основные сведения об объемных и граничных интегральных уравнениях.

Отдельная глава посвящена электрофизическим и электрохимическим процессам в геологической среде естественного и искусственного происхождения. Она включает основы теории сейсмозлектрических и поляризационных явлений в пористых и флюидонасыщенных средах (горных породах) и на контакте электронных и ионных проводников.

Обосновывается правомочность применения основных понятий и методов теории информации в геоэлектрике, показывается связь теории информации с теорией обратных задач геофизики, с информационной точки зрения сравниваются различные методы геоэлектрики и используемые в них возбуждающие сигналы, предлагаются критерии для информационной оценки измерительных устройств и результатов наблюдений в геоэлектрике.

Последняя глава, написанная В. И. Дмитриевым и М. Н. Бердичевским, посвящена изложению основ теории обратных задач и методам их решения. Теоретические результаты иллюстрируются примерами решения обратных задач в магнитотеллурике.

Книга предназначена научным работникам, инженерам и студентам геофизической специальности, но будет интересна специалистам в других разделах естественных наук, использующим в своей работе физические и математические методы исследования.

Издательство ЛКИ. 117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 9.
Формат 60×90/16. Печ. л. 41. Зак. № 7

Отпечатано в ГП Калужской области «Облиздат». 248640, г. Калуга, пл. Старый торг. д. 5.

ISBN 978-5-382-00566-9

© Издательство ЛКИ, 2007



5004 ID 55440



Оглавление

Предисловие	7
Глава 1. Введение в макроскопическую электродинамику	9
§ 1. Уравнения макроскопической электродинамики	9
1.1. Макроскопическая электродинамика сплошных сред	9
1.2. Уравнения Максвелла	12
1.3. Материальные соотношения связи и уравнения ЭМ поля относительно E и H	15
1.4. Материальные связи в некоторых типах неоднородных на мезоуровне сред	23
§ 2. Условия корректной постановки прямых задач электродинамики	26
2.1. Начальные условия	27
2.2. Краевые условия	28
2.3. Условия сопряжения	31
2.4. Теорема единственности	36
§ 3. Гармонически изменяющееся ЭМ поле и электромагнитные параметры геологической среды	37
3.1. Символический способ записи монохроматического поля	38
3.2. Уравнения Максвелла в частотной области	44
3.3. Понятие комплексной частоты	45
3.4. Аналитические свойства и частотная дисперсия проводимости среды	47
§ 4. Дифференциальные уравнения ЭМ поля второго порядка	52
4.1. Уравнения второго порядка относительно напряженностей поля	53
4.2. Электродинамические потенциалы	57
§ 5. Возбудители ЭМ поля	63
5.1. Источники и вихри векторного поля	63
5.2. Сторонние возбудители ЭМ поля	70
5.3. Локализованные сторонние токи и их разбиение на потенциальную и вихревую части	73
5.4. Альтернативная форма записи сторонних возбудителей в уравнениях Максвелла. Магнитные токи	76
§ 6. Основные принципы и теоремы электродинамики	83
6.1. Энергия ЭМ поля. Теорема Умова—Пойнтинга	84
6.2. Теорема и формулы Грина	86
6.3. Лемма Лоренца	89
6.4. Теорема взаимности	90
6.5. Теорема эквивалентности	91
6.6. Принцип суперпозиции	94
6.7. Принцип перестановочной двойственности	94

Глава 2. Постоянное ЭМ поле	95
§ 7. Постоянное ЭМ поле в σ — ϵ — μ среде	95
7.1. Виды постоянных ЭМ полей и их информационные геофизические возможности	95
7.2. Постоянное электрическое поле в σ — ϵ среде. Токи и заряды	100
7.3. Простейшие возбудители электростатического и стационарного электрического полей	107
7.4. Возбудители постоянного магнитного поля	117
§ 8. Стационарное электрическое поле	120
8.1. Дифференциальное уравнение стационарного электрического поля второго порядка и методы его решения	120
8.2. Решения геоэлектрических задач в стационарном электрическом поле	131
§ 9. Стационарное магнитное поле	182
9.1. Дифференциальные уравнения стационарного магнитного поля и методы их решения	182
9.2. Аналитическое представление стационарного магнитного поля и решения некоторых задач	193
§ 10. Спектрально-пространственный анализ и фокусировка поля	215
10.1. Спектрально-пространственный анализ (СПАН) электроразведочных данных	215
10.2. Фокусировка постоянного ЭМ поля	225
Глава 3. Скаляризация и разделение переменных в векторных уравнениях электродинамики	245
§ 11. Отделение временного аргумента от пространственных аргументов в уравнениях электродинамики	245
11.1. Отделение временной переменной в уравнениях квазистационарного поля и общая форма представления квазистационарных переходных процессов	246
11.2. Сопоставление квазистационарных и волновых ЭМ полей	255
11.3. Частотные характеристики квазистационарного ЭМ поля в области комплексной частоты	259
§ 12. Скаляризация векторных электродинамических уравнений	263
12.1. Общий смысл понятия скаляризации	263
12.2. Скаляризация трехмерных (3D) электродинамических задач с помощью полей электрического и магнитного типов	266
12.3. Калибровка потенциалов. Скалярные уравнения поля	274
12.4. Скаляризация уравнений Максвелла в двумерных (2D) задачах электродинамики	282
§ 13. Разделение пространственных переменных в скалярных уравнениях электродинамики	285
13.1. Разделение переменных в трехмерных скалярных уравнениях поля	285
13.2. Разделение переменных в двумерных скалярных уравнениях поля	292
13.3. Разделение переменных в сферической, круговой цилиндрической и декартовой системах координат	297

Глава 4. Аналитические решения геоэлектрических задач в переменном ЭМ поле	304
§ 14. Переменные ЭМ поля в однородном неограниченном пространстве	304
14.1. ЭМ поля в однородном изотропном пространстве	304
14.2. ЭМ поля в однородном анизотропном пространстве	324
§ 15. Модель горизонтально-слоистой среды	334
15.1. Общее решение	335
15.2. ЭМ поля основных возбудителей в простейших моделях среды	354
§ 16. Модель цилиндрически слоистой среды	401
16.1. Общее решение осесимметричной задачи для цилиндрически слоистой трансверсально изотропной среды в поле дипольных возбудителей	401
§ 17. Локальные проводники в переменном ЭМ поле	409
17.1. Сферический проводник	409
17.2. Круговой цилиндрический проводник	425
17.3. Вытянутый сфероидальный проводник	430
17.4. Вторичные поля электрического и магнитного типов	434
17.5. Идеально проводящая полуплоскость в переменном ЭМ поле	437
Глава 5. Интегральные представления решений и интегральные уравнения электродинамики	441
§ 18. Интегральные представления решений и функции Грина	441
18.1. Скалярные интегральные представления	442
18.2. Векторные интегральные представления. Аффинорная функция Грина	449
18.3. Интегральные представления Стрэттона—Чу	455
§ 19. Интегральные уравнения электродинамики	457
19.1. Скалярные интегральные уравнения	457
19.2. Векторные интегральные уравнения	462
19.3. Интегральные уравнения, основанные на формулах Стрэттона—Чу	465
19.4. Связь между функциями Грина уравнений Гельмгольца и Лапласа	467
19.5. Краткая характеристика современного состояния проблемы	472
Глава 6. Электрофизические и электрохимические процессы в геологической среде	473
§ 20. Сейсмoeлектрические явления	474
20.1. Сейсмoeлектрический эффект 1-го рода	474
20.2. Сейсмoeлектрический эффект 2-го рода	476
§ 21. Вызванная и естественная поляризация геологической среды	503
21.1. Общая геофизическая характеристика метода вызванной поляризации	503
21.2. Двойной электрический слой	506
21.3. ВП электрокинетической природы	511
21.4. ВП электрохимической природы	521

21.5. Феноменологический подход к интерпретации ВП	523
21.6. Естественное электрическое поле (ЕП)	540
Глава 7. Теоретико-информационные основы геоэлектрики	542
§ 22. Модель системы геофизических исследований	543
§ 23. Основные понятия теории информации. Теоремы кодирования информации и регуляризация обратных задач	552
23.1. Энтропия, количество информации	552
23.2. Теоремы кодирования К. Шеннона и их геофизическая интерпретация	562
23.3. Связь теории кодирования и декодирования информации с теорией обратных геофизических задач	581
§ 24. Некоторые приложения теории информации к электроразведке	586
24.1. Информационные преобразования: смысл и полезность	586
24.2. Информационные оценки экспериментальных данных	590
24.3. Оценка информационной связи между разнородными наблюдаемыми данными	595
24.4. Информационная оценка сигналов, возбуждающих ЭМ поле	600
Глава 8. Об обратных задачах геоэлектрики	609
§ 25. Условно-корректная постановка обратных задач	609
§ 26. Решение обратных задач методом подбора	611
§ 27. Принцип регуляризации в обратных задачах	613
§ 28. Регуляризованный метод подбора	615
§ 29. Разрешающая способность и детальность решения обратной задачи	616
§ 30. Постановка обратной магнитотеллурической задачи	618
§ 31. Одномерная обратная задача МТЗ	621
§ 32. Многомерные обратные задачи магнитотеллурики	625
§ 33. Методы решения многомерных обратных задач магнитотеллурики	633
Литература	638