

Оглавление

Предисловие научного редактора	5
Предисловие к русскому изданию	6
Предисловие	15
I Введение в теорию поля	19
1 Дифференциальное исчисление векторных полей и дифференциальных форм	21
1.1 Основные дифференциальные соотношения теории поля	21
1.1.1 Понятие физического поля	21
1.1.2 Скалярные и векторные произведения векторов	22
1.1.3 Векторные дифференциальные операторы	24
1.1.4 Дифференцирование произведений скалярных и векторных полей	27
1.2 Основные интегральные соотношения теории поля	27
1.2.1 Понятие работы и потока поля	27
1.2.2 Теорема Гаусса и ее векторные формулировки	29
1.2.3 Теорема Стокса и ее векторные формулировки	31
1.2.4 Формулы Грина	32
1.3 Дифференциальные формы в теории поля	33
1.3.1 Понятие дифференциальной формы	33
1.3.2 Внешнее произведение линейных форм	35
1.3.3 Канонические представления дифференциальных форм в трехмерном евклидовом пространстве	36
1.3.4 Внешняя производная	37
2 Основы теории поля	41
2.1 Возбуждение поля	41
2.1.1 Гармонические функции; теорема Лиувилля	41
2.1.2 Однозначность определения скалярного поля по его градиенту и векторного поля по его дивергенции и ротору	43
2.1.3 Условия возбуждения поля	44
2.1.4 Источники поля и их физический смысл	45
2.1.5 Вихри поля и их физический смысл	47
2.1.6 Поле источников и вихревое поле	50
2.2 Уравнения стационарного поля и способы их решения	50
2.2.1 Уравнения Пуассона для скалярных и векторных полей	50
2.2.2 Точечный источник; сингулярная функция Дирака	52
2.2.3 Фундаментальная функция Грина для уравнения Лапласа	53
2.3 Скалярный и векторный потенциал стационарного поля	56
2.3.1 Скалярный потенциал поля источника	56
2.3.2 Векторный потенциал вихревого поля	57
2.3.3 Теорема Гельмгольца и классификация векторных полей	58
2.4 Нестационарные поля и дифференциальные формы	59

2.4.1	Нестационарные векторные поля и дифференциальные формы в четырехмерном пространстве E_4	59
2.4.2	Уравнения дифференциальных форм	61
2.4.3	Дифференциальные формы Ампера и уравнение непрерывности	63
2.4.4	Дифференциальные формы Фарадея и четырехпотенциал	63
2.4.5	Уравнения нестационарного векторного поля	64
II Основы электромагнитной теории		67
3	Уравнения электромагнитного поля	69
3.1	Уравнения Максвелла и граничные условия	70
3.1.1	Основные уравнения теории электромагнитных полей	70
3.1.2	Физическая интерпретация уравнений Максвелла	73
3.1.3	Граничные условия для векторного поля	77
3.1.4	Поле в однородной среде	82
3.2	Стационарное гармоническое электромагнитное поле	83
3.3	Электромагнитная энергия и теорема Пойнтинга	85
3.3.1	Условия излучения	85
3.3.2	Теорема Пойнтинга во временной области	86
3.3.3	Энергетическое неравенство во временной области	87
3.3.4	Теорема Пойнтинга в частотной области	89
3.4	Тензоры Грина электромагнитного поля	90
3.4.1	Тензоры Грина в частотной области	90
3.4.2	Тензоры Грина во временной области	91
3.5	Принцип взаимности	93
3.5.1	Лемма Лоренца	93
3.5.2	Принцип взаимности для тензоров Грина и электромагнитных полей	94
3.5.3	Теоремы представления тензоров Грина электромагнитного поля	95
4	Модели электромагнитной индукции в земле	100
4.1	Модели электромагнитных полей	100
4.2	Стационарные электромагнитные поля	101
4.2.1	Электростатические поля и электростатические потенциалы	101
4.2.2	Граничные условия для электростатического потенциала	104
4.2.3	Расчет электростатического поля заданного распределения зарядов	105
4.2.4	Аналогия между полями постоянного тока и электростатическими полями	106
4.2.5	Магнитное поле постоянных токов и закон Био-Савара	108
4.2.6	Точечные и дипольные источники в однородной среде	110
4.2.7	Потенциал постоянного тока в анизотропной среде	115
4.3	Диффузия электромагнитного поля в проводящей среде	118
4.3.1	Монохроматические квазистационарные электромагнитные поля	119
4.3.2	Плоские электромагнитные волны в однородной среде	120
4.3.3	Электромагнитные потенциалы	125
4.3.4	Квазистационарное поле дипольного источника в однородной среде	126
4.3.5	Сферические электромагнитные волны	129
4.4	Электромагнитные волны	132
5	Электромагнитные поля в горизонтальнослоистой среде	134
5.1	Распространение плоских волн в слоистой среде	134
5.1.1	Плоская электромагнитная волна в горизонтальнослоистой среде	134
5.1.2	Низкочастотная асимптотика волнового импеданса	140
5.1.3	Определение частотных окон	142
5.2	Спектральный метод расчета электромагнитных полей в горизонтальнослоистой среде	143

5.2.1	Преобразование Фурье в пространственной области	144
5.2.2	Точечный источник поля постоянного тока в горизонтальнослоистой среде	147
5.2.3	Электрическое поле точечного источника в слоистой среде	155
5.2.4	Поле электрического диполя в горизонтальнослоистой среде	158
5.2.5	Выражения для электрических полей в горизонтальнослоистой среде с использованием преобразования Ханкеля	159
5.3	Электромагнитное поле произвольной системы магнитосферных токов в горизонтально-слоистой среде	162
5.3.1	Спектральные представления электромагнитного поля в горизонтальнослоистой среде	162
5.3.2	Теорема Липской-Ваньяна для импедансного отношения	164
5.3.3	Горизонтальная поляризация электрического поля в горизонтально-однородной среде и приведенный спектральный импеданс	165
5.4	Электромагнитные поля, генерируемые в слоистой среде электрическими и магнитными дипольными излучателями	168
5.4.1	Спектральное представление поля горизонтального токового диполя на поверхности горизонтальнослоистой среды	168
5.4.2	Электромагнитное поле горизонтального токового диполя на поверхности однородного полупространства	172
5.4.3	Представление в частотной области поля вертикального магнитного диполя над горизонтальнослоистой средой	175
5.4.4	Магнитное поле вертикального магнитного диполя на поверхности однородного полупространства	177
5.4.5	Анализ поля в ближней и дальней зонах источника	178
5.4.6	Частотный метод расчета неустановившихся полей	180
5.4.7	Становление поля дипольного источника в однородной среде и на поверхности однородного проводящего полупространства; поля в ближней и дальней зонах	183
6	Электромагнитные поля в неоднородной среде	193
6.1	Метод интегральных уравнений	194
6.1.1	Фоновая (нормальная) и аномальная части электромагнитного поля	194
6.1.2	Теорема Пойнтинга и энергетическое неравенство для аномального поля	195
6.1.3	Метод двумерных интегральных уравнений	195
6.1.4	Расчет первой вариации (производной Фреше) электромагнитного поля для двумерных моделей	198
6.1.5	Метод интегральных уравнений в трех измерениях	199
6.1.6	Расчет первой вариации (производной Фреше) электромагнитного поля для трехмерных моделей	201
6.2	Метод интегральных уравнений в моделях с неоднородной фоновой проводимостью	203
6.2.1	Модель с неоднородной фоновой удельной проводимостью	204
6.2.2	Контроль точности метода интегральных уравнений с неоднородной фоновой удельной проводимостью	207
6.3	Семейство линейных и нелинейных интегральных представлений электромагнитного поля	209
6.3.1	Борновские и расширенные борновские приближения	210
6.3.2	Квазилинейное приближение и тензорное квазилинейное уравнение	211
6.3.3	Квазилинейное приближение с использованием многосеточного подхода	212
6.3.4	Квазианалитические решения для трехмерного электромагнитного поля	213
6.3.5	Квазианалитическое приближение для модели с изменяющимся фоном	215
6.3.6	Квазианалитические решения для двумерных электромагнитных полей	218
6.3.7	Локализованное нелинейное приближение	218
6.3.8	Локализованное квазилинейное приближение	219
6.4	Методы дифференциальных уравнений	221
6.4.1	Уравнения поля и граничные условия	222
6.4.2	Уравнения электромагнитных потенциалов и граничные условия	224

6.4.3	Конечно-разностное представление краевой задачи	226
6.4.4	Дискретизация уравнений Максвелла с использованием разнесенной сетки	226
6.4.5	Дискретизация дифференциальных уравнений второго порядка с использованием метода баланса	229
6.4.6	Дискретизация дифференциальных уравнений электромагнитных потенциалов	233
6.4.7	Решение граничных задач методом конечных элементов	235
III Решение обратных задач и визуализация электромагнитных данных		245
7	Принципы решения некорректных обратных задач	247
7.1	Некорректные обратные задачи	247
7.1.1	Формулировка корректных и некорректных задач	247
7.1.2	Множество корректности	248
7.1.3	Квазирешение некорректных задач	249
7.2	Основы теории регуляризации	250
7.2.1	Определение функционала невязки	250
7.2.2	Регуляризующие операторы	252
7.2.3	Стабилизирующие функционалы	253
7.2.4	Параметрический функционал Тихонова	257
7.3	Параметр регуляризации	258
7.3.1	Метод Тихонова для выбора параметра регуляризации	258
7.3.2	Метод L-кривой для выбора параметра регуляризации	260
8	Инверсия электромагнитных данных	263
8.1	Линейные методы инверсии	263
8.1.1	Инверсия на основе приближения Борна	263
8.1.2	Дискретная линейная обратная задача	264
8.1.3	Метод регуляризации Тихонова для линейной инверсии	265
8.1.4	Определение весовых матриц для параметров моделей и данных	266
8.1.5	Приближенное регуляризованное решение линейной обратной задачи	268
8.1.6	Метод Левенберга—Маркварда	270
8.1.7	Построение геоэлектрического изображения среды с помощью приближения Борна	270
8.1.8	Итерационные методы инверсии с использованием борновского приближения	274
8.2	Нелинейная инверсия	275
8.2.1	Формулировка нелинейной обратной задачи для электромагнитных полей	275
8.2.2	Регуляризованное решение нелинейной обратной задачи для дискретных электромагнитных данных	275
8.2.3	Метод скорейшего спуска для нелинейной регуляризованной инверсии	276
8.2.4	Метод Ньютона для нелинейной регуляризованной обратной задачи	277
8.2.5	Численные алгоритмы метода Ньютона	278
8.2.6	Нелинейная инверсия при помощи метода сопряженных градиентов	278
8.2.7	Численный алгоритм регуляризованного метода сопряженных градиентов	279
8.2.8	Расчет производной Фреше	280
8.3	Квазилинейная инверсия	282
8.3.1	Принципы квазилинейной инверсии	282
8.3.2	Локализованная квазилинейная инверсия	283
8.4	Квазианалитическая инверсия	283
8.4.1	Расчет производной Фреше	283
8.4.2	Инверсия на основе квазианалитического метода	284

9	Миграция электромагнитного поля	287
9.1	Миграция электромагнитного поля во временной области	288
9.1.1	Физические принципы миграции электромагнитного поля	288
9.1.2	Миграция в модели с однородной фоновой проводимостью	289
9.1.3	Миграция с использованием интегрального преобразования	290
9.2	Аналитическое продолжение и миграция в области (k, ω)	291
9.2.1	Аналитическое продолжение электромагнитного поля	291
9.2.2	Миграция как спектральное преобразование	293
9.2.3	Форма свертки оператора миграции	294
9.2.4	Построение цифрового фильтра для миграции электромагнитного поля	295
9.2.5	Спектральная характеристика цифрового фильтра	297
9.3	Конечно-разностная миграция	299
9.3.1	Двухмерная конечно-разностная миграция	299
9.3.2	Конечно-разностная миграция трехмерного электромагнитного поля	302
9.4	Визуализация геоэлектрических структур с использованием миграции в частотной и временной областях	304
9.4.1	Условие миграционной визуализации в частотной области	304
9.4.2	Условие миграционной визуализации во временной области	306
9.5	Миграция и инверсия	307
9.5.1	Формулировка обратной задачи	308
9.5.2	Общая концепция миграции аномального поля	308
9.5.3	Общие условия миграционной визуализации	310
9.5.4	Регуляризованная итерационная миграция	312
IV	Геофизические электромагнитные методы	317
10	Электромагнитные свойства пород и минералов	319
10.1	Свойства пород и единицы измерения	319
10.1.1	Удельные проводимость и сопротивление	319
10.1.2	Диэлектрическая проницаемость	320
10.1.3	Магнитная проницаемость	322
10.1.4	Волновое число	322
10.2	Свойства в параметрическом смысле	323
10.2.1	Электрические свойства породообразующих минералов и горных пород	324
10.2.2	Вызванная поляризация	333
10.2.3	Диэлектрические свойства породообразующих минералов	336
10.2.4	Магнитные свойства минералов	339
10.3	Эффективная удельная проводимость гетерогенных многофазных пород	340
10.3.1	Комбинация проводящих минералов во вмещающей среде	340
10.3.2	Принципы теории эффективной среды	340
10.3.3	Эффективная удельная проводимость гетерогенной среды	344
10.4	Свойства в экзистенциальном смысле	346
10.4.1	Концепция геоэлектрической структуры и геоэлектрического разреза	346
10.4.2	Продольная проводимость и поперечное сопротивление горизонтальнослоистого геоэлектрического разреза	347
10.5	Свойства крупномасштабных геоэлектрических структур	349
10.5.1	Геоэлектрические мезоструктуры и мегаструктуры	349
10.5.2	Океаны	351
10.5.3	Атмосфера	353

11	Возбуждение и измерение электромагнитных полей в геофизике	356
11.1	Возбуждение поля	356
11.1.1	Источники электромагнитных полей	356
11.1.2	Кабели	358
11.1.3	Система заземления	359
11.2	Измерение электрических и магнитных полей	363
11.2.1	Напряжение, потенциал и электрическое поле	363
11.2.2	Измерение магнитного поля	368
11.3	Предварительная обработка данных	377
11.3.1	Выборка во времени	378
11.3.2	Аналогово-цифровое преобразование	379
11.3.3	Фильтрация	379
11.3.4	Накопление	384
11.3.5	Деконволюция	385
12	Метод постоянного тока и метод вызванной поляризации	387
12.1	Вертикальное электрическое зондирование и кажущееся удельное сопротивление	388
12.1.1	Методы вертикального электрического зондирования	389
12.1.2	Трехточечная электродная установка	394
12.1.3	Дипольное зондирование	395
12.2	Методы вызванной поляризации (ВП)	399
12.2.1	Явление вызванной поляризации	399
12.2.2	Метод ВП в частотной и временной области	400
12.2.3	Модель удельного сопротивления/ВП для типичного медно-порфирового месторождения в юго-восточной части США	403
12.3	Физические и математические модели явления ВП	404
12.3.1	Явление ВП в контексте теории эффективной среды	407
12.3.2	Эффективная удельная проводимость гетерогенной поляризуемой среды	410
12.3.3	Самосогласованное приближение эффективной удельной проводимости	411
12.3.4	Эффект анизотропии в данных ВП	412
12.3.5	Фундаментальная модель ВП: эффективное удельное сопротивление изотропной многофазной гетерогенной среды, заполненной сферическими включениями	413
12.4	Нелинейное регуляризованное обращение данных ВП на основании модели Коула-Коула	417
12.4.1	Моделирование вызванной поляризации на основе локализованного квазилинейного приближения	417
12.4.2	Обращение на основе локализованного квазилинейного приближения	418
12.4.3	Регуляризованное решение уравнения свойств материала	419
12.4.4	Количественная интерпретация данных ВП — перспективы	422
13	Магнитотеллурические и магнитовариационные методы	428
13.1	Внешнее электромагнитное поле Земли	428
13.1.1	Изменения магнитного поля в спокойные периоды	430
13.1.2	Микропульсации	431
13.1.3	Магнитные бури	433
13.1.4	Суббури	435
13.2	Модель магнитотеллурического поля Тихонова-Каньяра	435
13.2.1	Модель Тихонова-Каньяра	435
13.2.2	Концепции кажущегося удельного сопротивления и зондирования	436
13.2.3	Связь между кривой магнитотеллурического зондирования и фактическим однородным распределением удельного сопротивления в модели	437
13.3	Теория магнитотеллурических и магнитовариационных передаточных функций	442
13.3.1	Магнитотеллурические операторы импеданса и адмитанса, теллурические и магнитные	443
13.3.2	Векторы индукции и магнитные и электрические типперы	446

13.3.3	Спектральный магнитотеллурический импеданс	447
13.4	Магнитотеллурические поля в горизонтально-неоднородной среде	450
13.4.1	Понятия внешней и внутренней, нормальной и аномальной составляющих электромагнитного поля	450
13.4.2	Аномальные электромагнитные поля и их классификация	452
13.4.3	Поля в двумерно-неоднородной среде и понятие электрической и магнитной поляризации	452
13.5	Магнитотеллурическое и магнитовариационное зондирование	454
13.5.1	Методы магнитотеллурического зондирования, магнитотеллурического профилирования и картирования теллурического тока	454
13.5.2	Методы магнитовариационного зондирования и магнитовариационного профилирования	456
13.5.3	Метод комплексного геомагнитного глубинного зондирования	457
13.6	Обработка и анализ данных магнитотеллурического и магнитовариационного методов	458
13.6.1	Метод наименьших квадратов	458
13.6.2	Метод удаленной привязки	464
13.6.3	Робастная оценка матриц магнитотеллурических и магнитовариационных параметров	465
13.6.4	Графическое представление матриц магнитотеллурических и индукционных параметров	469
13.7	Одномерная интерпретация данных магнитотеллурического метода	470
13.7.1	Анализ искаженных кривых магнитотеллурического зондирования	472
13.7.2	Быстрый и приближенный анализ данных магнитотеллурического зондирования	476
13.7.3	Количественная интерпретация кривых магнитотеллурического зондирования с использованием одномерных моделей	479
13.8	Интерпретация данных магнитовариационного профилирования и геомагнитного глубинного зондирования	480
13.8.1	Разделение поля на внутреннюю и внешнюю составляющую	481
13.8.2	Разделение поля на нормальную и аномальную составляющую	484
13.9	Быстрое трехмерное обращение данных магнитотеллурического метода на основе линейного и квазилинейного приближения	485
13.9.1	Итеративное борновское обращение данных магнитотеллурического метода	486
13.9.2	Обращение данных магнитотеллурического метода на основе квазианалитического метода	487
13.9.3	Регуляризованное гладкое и фокусирующее обращение данных магнитотеллурического метода	489
13.9.4	Принципы регуляризованного обращения с повторным взвешиванием	489
13.9.5	Нелинейная параметризация с минимальной опорой	492
13.9.6	Практический пример 1: инверсия магнитотеллурических данных, полученных при исследовании Войси Бэй (Канада)	494
13.9.7	Практический пример 2: трехмерная инверсия магнитотеллурических данных, полученных компанией Phoenix Geophysics в Онтарио, Канада	496
13.10	Строгая трехмерная инверсия данных магнитотеллурического метода	500
13.10.1	Регуляризация Тихонова в инверсии полного тензора магнитотеллурического импеданса	500
13.10.2	Оператор Фреше и его сопряженный оператор в двухкомпонентной инверсии импеданса	501
13.10.3	Оператор Фреше в инверсии полного тензора магнитотеллурического импеданса	502
13.10.4	Расчет производной Фреше с использованием квазианалитического приближения с переменным фоном	504

14	Электромагнитные методы в частотной и временной областях	510
14.1	Электромагнитное зондирование в частотной и временной областях	511
14.1.1	Взаимная связь	514
14.1.2	Теоретические кривые электромагнитного зондирования в частотной области	516
14.1.3	Электромагнитное зондирование во временной области	520
14.1.4	Свойства кривых электромагнитного зондирования во временной области	527
14.2	Интерпретация данных электромагнитного зондирования с контролируемым источником во временной области с использованием метода тонкого слоя	531
14.2.1	Тонкопленочные модели Прайса-Шейнмана и Тихонова-Дмитриева с горизонтально изменяющейся проводимостью	531
14.2.2	Становление поля магнитного диполя над проводящим тонким слоем	533
14.2.3	Метод S-инверсии	538
14.3	Электромагнитное профилирование и зондирование	540
14.3.1	Профилирование с двумя петлями	540
14.3.2	Профилирование с использованием мощных стационарных источников	540
14.3.3	Методы переходных процессов: УТЕМ, ЛОТЕМ и МТЕМ	541
15	Морские электромагнитные методы	545
15.1	Морской магнитотеллурический метод	546
15.1.1	Основные характеристики донного электромагнитного оборудования	546
15.1.2	Сравнение наземных и донных электромагнитных аномалий	549
15.1.3	Практический пример: морские магнитотеллурические исследования в Мексиканском заливе	549
15.2	Морские электромагнитные методы с использованием контролируемого источника	553
15.2.1	Электроразведка на мелководье	553
15.2.2	Электроразведка на больших глубинах в океанах	555
15.2.3	Использование морского метода электромагнитного зондирования с контролируемым источником для морской разведки нефти и газа	559
15.2.4	Интерпретация данных метода морского электромагнитного зондирования с контролируемым источником	563
15.2.5	Практический пример: итерационная миграция данных морского электромагнитного зондирования с контролируемым источником для газовой провинции Тролль	570
16	Другие платформы, другие методики	580
16.1	Методы аэроэлектромагнитной разведки	580
16.1.1	Аэроразведка в частотной области	581
16.1.2	Аэроразведка методом переходных процессов	592
16.1.3	Методы воздушной электромагнитной разведки в дальней зоне	594
16.2	Георадар	597
16.3	Скважинные методы	602
16.3.1	Скважинно-поверхностные методы	602
16.3.2	Межскважинная электромагнитная томография	606
16.4	Другие методы электромагнитной разведки	610
16.4.1	Пьезоэлектрический метод	610
16.4.2	Метод спонтанной поляризации	612
A	Алгебра дифференциальных форм	620
A.1	Дифференциальные формы в трехмерном пространстве	620
A.1.1	1-, 2- и 3-формы	620
A.1.2	Внешнее произведение дифференциальных форм	621
A.1.3	Базис дифференциальных форм	622
A.2	Дифференциальные формы в многомерных пространствах	625
A.2.1	Евклидово пространство	625
A.2.2	Дифференциальные формы в евклидовом пространстве E_n	627

A.2.3	Дифференциальные формы в пространстве Минковского M_4	628
В	Исчисление дифференциальных форм	631
В.1	Внешнее дифференцирование форм	631
В.1.1	Внешний дифференциальный оператор в n -мерном пространстве E_n	631
В.1.2	Внешний дифференциальный оператор в четырехмерном пространстве M_4	633
В.2	Интегрирование форм	636
В.2.1	Трехмерное пространство E_3	636
В.2.2	За пределами трехмерного пространства	637
С	Математические обозначения	639
Д	Определение полей и единицы измерений	641
Е	Линейные операторы и их матрицы	643
	Список литературы	645
	Предметный указатель	668