

В.В. Спичак

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ
ТОМОГРАФИЯ
ЗЕМНЫХ
НЕДР**



В.В. Спичак

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТОМОГРАФИЯ ЗЕМНЫХ
НЕДР**

**Москва
Научный мир
2019**

УДК 550.837
ББК 31.222
С72

Спичак В.В.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТОМОГРАФИЯ ЗЕМНЫХ НЕДР – М.: Научный мир, 2019. – 376 с.

ISBN 978-5-91522-487-1

Монография посвящена современным методам построения геофизических моделей по данным электромагнитных зондирований. С этой целью используются две парадигмы: байесовский статистический анализ и нейросетевые алгоритмы. Большое внимание уделено исследованию вопросов влияния объема и качества данных, а также априорной информации на результаты интерпретации. Приведены оригинальные алгоритмы построения трехмерных моделей электропроводности в условиях недостаточности электромагнитных данных. Изучена геоэлектрическая структура известных вулканов (Везувий, Килауэя, Эльбрус, Комагатаке, Хенгидль), геотермальных зон (Травале, Италия; Сульц-су-Форе, Эльзас), а также разломов в земной коре. На основе комплексного анализа геофизических данных предложены новые концептуальные модели ряда геологических объектов. Даны методические рекомендации по электромагнитной томографии резервуаров геотермальной энергии и углеводородов. Рассмотрены методы прогноза петрофизических свойств пород по данным удельного электрического сопротивления как прокси-параметра. Приведены методики прогнозирования температуры, скоростей сейсмических волн и пористости пород по данным электромагнитных зондирований. Для специалистов в области электромагнитных методов зондирования Земли и разведочной геофизики.



Публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-15-00009/19-«д»).
Издание РФФИ не подлежит продаже.

ISBN 978-5-91522-487-1

© Спичак В.В. , 2019
© Издательство «Научный мир», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	13
ЧАСТЬ I. МЕТОДОЛОГИЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ.....	15
Глава 1. ТРЕХМЕРНАЯ БАЙЕСОВСКАЯ ИНВЕРСИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ.....	17
1.1. Введение	17
1.2. Метод решения обратной задачи с помощью байесовской статистики.....	18
1.2.1. Байесовский подход	18
1.2.2. Алгоритм инверсии.....	20
1.2.3. Программная реализация метода.....	22
1.2.3.1. Оптимизация численной схемы	22
1.2.3.2. Тестирование пакета программ INVSTAT3D	23
1.3. Оценка влияния априорной информации и данных на результаты инверсии.....	24
1.3.1. Влияние априорной информации	24
1.3.2. Относительная важность данных и априорной информации	27
1.3.3. Влияние объема и структуры данных	29
1.4. Модельный пример	33
1.4.1. Постановка задачи	33
1.4.2. Оценка разрешающей способности аудио-МТ-данных	35
1.5. Выводы.....	35
Литература	37
Глава 2. МЕТОДОЛОГИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОЦЕНКИ МАКРОПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ.....	39
2.1. Введение	39
2.2. Метод обратного распространения ошибок (МОРО).....	40
2.3. Постановка модельной задачи	43
2.4. Архитектура ИНС	43
2.4.1. Типы функции отклика в скрытых и выходном слоях.....	44

2.4.2. Количество нейронов в скрытом слое.....	46
2.4.3. Эффект второго скрытого слоя.....	48
2.4.4. Пороговый уровень.....	48
2.5. Влияние типа, объема и структуры пула обучающих данных.....	48
2.5.1. Влияние типа трансформаций электромагнитных данных.....	48
2.5.2. Влияние объема данных.....	51
2.5.3. Влияние структуры данных.....	52
2.5.3.1. Случайный выбор наборов модельных данных.....	52
2.5.3.2. Пробелы в базе обучающих данных.....	54
Нехватка данных по одному из параметров модели.....	54
Случай «отсутствия аномалии».....	56
2.6. Экстраполяционные возможности ИНС.....	58
2.7. Влияние помех.....	59
2.8. Результаты нейросетевого моделирования.....	60
2.9. Пример нейросетевой реконструкции макропараметров среды (разлом Мину, Япония).....	62
2.9.1. Построение объемного изображения.....	64
2.9.2. Двумерная инверсия МТ-данных.....	65
2.9.3. Нейросетевая оценка макропараметров среды.....	68
2.9.4. Проверка результатов ИНС-инверсии.....	69
2.9.5. Обсуждение результатов.....	70
2.10. Выводы.....	71
Литература.....	71

Глава 3. ПОСТРОЕНИЕ 3D-ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТОЧНОСТИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....

3.1. Введение.....	74
3.2. Случай единственного профиля.....	75
3.2.1. Влияние используемых компонент тензора импеданса.....	75
3.2.2. Влияние априорной информации о фоновом разрезе.....	76
3.2.2.1. Тестовая модель и синтетические данные.....	76
3.2.2.2. 3D-инверсия профильных МТ-данных.....	77
3.3. Влияние данных, измеренных на дополнительном профиле.....	79
3.3.1. Тестовая модель и синтетические данные.....	79
3.3.2. Результаты 3D-инверсии.....	79
3.3.2.1. Влияние используемых трансформаций данных.....	80
3.3.2.2. Влияние расположения дополнительного профиля.....	82
3.4. Влияние использования архивных данных в окрестности профиля.....	83
3.4.1. Геология региона исследований.....	83
3.4.2. Магнитотеллурические данные.....	85
3.4.3. Алгоритм совместной инверсии скалярных и тензорных МТ-данных.....	85

3.4.4. 3D-модель кажущегося сопротивления по архивным скалярным данным.....	86
3.4.5. 2D-инверсия тензорных МТ-данных.....	88
3.4.6. Построение 2D ⁺ -модели по совокупности профильных и площадных МТ-данных.....	89
3.5. Выводы.....	90
Литература.....	91
Глава 4. МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА И ИНВЕРСИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ	94
4.1. Введение	94
4.2. Одновременная инверсия	96
4.2.1. Детерминистские методы.....	96
4.2.2. Стохастические методы.....	101
4.3. Последовательная инверсия.....	105
4.4. Методы классификации.....	107
4.4.1. Вероятностная кластеризация.....	108
4.4.2. Нейросетевая классификация	111
4.4.2.1. Метод максимального корреляционного подобия	111
4.4.2.2. Метод самоорганизующихся карт (Self-Organizing Map – SOM)	114
4.4.3. Гибридные подходы	114
4.5. Выводы.....	118
Литература.....	120
ЧАСТЬ II. МОДЕЛИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....	125
Глава 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЗОН.....	127
5.1. Введение	127
5.2. Концептуальные модели геотермальных областей.....	128
5.3. Факторы, влияющие на электрическое сопротивление пород.....	131
5.3.1. Температура.....	131
5.3.2. Пористость и проницаемость	132
5.3.3. Глинистые минералы	133
5.4. Оценка температуры, пористости, проницаемости и минералогии метаморфизованных пород по ЭМ-данным	135
5.4.1. Оценка температуры	135
5.4.2. Оценка пористости и проницаемости	136
5.4.3. Минералогия гидротермально метаморфизованных пород.....	138
5.5. ЭМ-методы визуализации геотермальных зон.....	138

5.5.1. Магнитотеллурические зондирования	138
5.5.2. Другие электромагнитные методы	142
5.6. Комплексование геофизических методов	145
5.7. ЭМ-картирование разломов и трещиноватых зон.....	149
5.8. ЭМ-мониторинг геотермальных резервуаров	151
5.9. Определение объектов бурения	152
5.10. Выводы.....	154
Литература	155

Глава 6. МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВУЛКАНОВ..... 162

6.1. Введение	162
6.2. Методика трехмерной визуализации строения вулканов.....	163
6.2.1. Интерпретация МТ-данных, заданных на рельефной поверхности	163
6.2.2. Геоэлектрическая модель вулкана Килауэа (Гавайские о-ва)	165
6.2.3. Псевдосечения трансформаций МТ-поля	165
6.3. Быстрая инверсия МТ-данных (вулкан Комагатаке, о-в Хоккайдо, Япония).....	168
6.4. Методика оценки параметров магматической камеры.....	171
6.4.1. Упрощенная модель вулкана Везувий (Италия).....	172
6.4.2. Оценка глубины и вертикальных границ магматической камеры.....	172
6.4.3. Оценка распределения электропроводности внутри магматической камеры.....	175
6.4.3.1. Влияние априорной информации об электропроводности расплава.....	175
6.4.3.2. Влияние априорной информации о глубине расположения камеры	175
6.4.4. Алгоритм пространственной локализации магматических камер и распределения электропроводности	176
6.5. Оценка параметров магматической камеры вулкана Эльбрус по МТ- и спутниковым данным	178
6.5.1. Геоэлектрический разрез литосферы Приэльбрусья по данным МТЗ... 178	
6.5.2. Оценка тектонической раздробленности литосферы Приэльбрусья по спутниковым данным	181
6.5.3. Восполнение недостающих данных электрического сопротивления.... 184	
6.5.4. Трехмерное распределение электрического сопротивления..... 184	
6.5.5. Обсуждение результатов..... 185	
6.6. Моделирование МТ-мониторинга электропроводности магмы в магматической камере.....	187
6.6.1. Упрощенная геоэлектрическая модель вулкана центрального типа	187
6.6.2. Оценка возможности мониторинга состояния расплава в магматической камере.....	187
6.7. Выводы.....	190
Литература	191

Глава 7. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ ИСЛАНДСКОГО ТИПА.....	196
7.1. Введение	196
7.2. Априорная геолого-геофизическая информация	199
7.2.1. Геология и вулканическая активность в регионе	199
7.2.2. Сейсмичность	202
7.2.3. Сейсмическая томография	203
7.2.4. Электромагнитные зондирования.....	204
7.3. Построение трехмерной модели электрического сопротивления	205
7.4. Построение объемной модели температуры по ЭМ-данным	209
7.4.1. Общая характеристика температуры.....	209
7.4.2. Локальные особенности распределения температуры	215
7.5. Источники тепла.....	216
7.6. Источники сейсмичности.....	219
7.7. Новая концептуальная модель коры.....	221
7.8. Выводы.....	222
Литература	223
Глава 8. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЗЫ В ВЕРХНЕЙ КОРЕ (по геофизическим данным для Северного Тянь-Шаня).....	228
8.1. Введение	228
8.2. Геология и сейсмичность	230
8.3. Модели сейсмических скоростей	232
8.4. Модель электрического сопротивления	235
8.4.1. Общая характеристика распределения удельного сопротивления.....	235
8.4.2. Двумерный разрез вдоль профиля	236
8.5. Модель плотности	239
8.5.1. Гравиметрические исследования	239
8.5.2. Двумерный разрез вдоль профиля	239
8.6. Модель литотипов	240
8.7. Модель температуры.....	243
8.7.1. Геотермические исследования	243
8.7.2. Данные и калибровка ЭМ-геотермометра	244
8.7.3. Двумерный разрез температуры	245
8.8. Оценки пористости и флюидонасыщенности	247
8.8.1. Оценка пористости.....	247
8.8.2. Оценка флюидонасыщенности	249
8.9. Концептуальная модель.....	250
8.9.1. Петрофизические признаки линзы	250
8.9.2. Природа геофизических аномалий	251
8.9.3. Механизм образования линзы.....	251
8.9.4. Сроки существования линзы.....	252
8.9.5. Связь флюидодинамики и геодинамических процессов	253

8.10. Выводы.....	254
Литература	254
Глава 9. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭНДОГЕННЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (на примере Сорского медно-молибденового комплекса, Россия).....	
261	261
9.1. Введение	261
9.2. Геолого-геофизическая характеристика района работ	262
9.3. Сорское медно-молибденовое месторождение	265
9.4. Трехмерная модель удельного сопротивления	265
9.5. Трехмерные модели сейсмических скоростей	269
9.6. Трехмерная модель плотности.....	272
9.7. Трехмерная модель литологического состава пород	273
9.8. Концептуальная модель месторождения	273
9.9. Выводы.....	278
Литература	279
Глава 10. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ РЕЗЕРВУАРОВ УГЛЕВОДОРОДОВ.....	
283	283
10.1. Введение	283
10.2. Картирование зон миграции углеводородных флюидов	284
10.3. Повышение достоверности поиска УВ в сложных геологических условиях	284
10.4. Снижение вероятности бурения пустых скважин.....	287
10.5. Ранжирование целей бурения	289
10.6. Нефть или вода?	290
10.6.1. Сравнительная чувствительность электромагнитной и сейсморазведки к типу флюида	290
10.6.2. Сравнительная чувствительность электромагнитной и сейсморазведки к флюидонасыщенности.....	291
10.7. Оценка коллекторских свойств пород вне скважин.....	292
10.8. Оконтуривание пространственных границ резервуара	293
10.9. Электромагнитный мониторинг состояния резервуара.....	295
10.10. Прогноз коллекторских свойств во время бурения.....	295
10.11. Выводы	297
Литература	298

ЧАСТЬ III. ПРОГНОЗ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД..... 301**Глава 11 ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДАННЫМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

(электромагнитный геотермометр)	303
11.1. Введение.....	303
11.2. ЭМ-прогноз температуры в межскважинном пространстве	305
11.2.1. Влияние объема данных	305
11.2.2. Влияние стратегии калибровки.....	308
11.2.3. Влияние локальных геологических и гидрогеологических условий ...	311
11.3. ЭМ-прогноз температуры на глубину ниже забоя скважин.....	312
11.3.1. Влияние соотношения глубин экстраполяции и скважины	312
11.3.2. Оценка робастности ЭМ-экстраполяции	314
11.4. Построение модели температуры в геотермальной области	
Сульц-су-Форе (Франция)	317
11.4.1. Геологические условия	317
11.4.2. Геотермические исследования	318
11.4.3. Магнитотеллурические зондирования	319
11.4.4. Тестирование ЭМ-геотермометра.....	321
11.4.4.1. Зависимость точности прогноза температуры от глубины	321
11.4.4.2. Зависимость точности прогноза температуры от точности данных по удельному сопротивлению	323
11.4.5. Оценка доминирующего механизма теплопередачи на больших глубинах	327
11.4.6. Построение модели температуры	328
11.4.7. Рекомендации по месту бурения новой скважины.....	331
11.5. Выводы	331
Литература	333

**Глава 12. ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ И УДЕЛЬНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОРОД ПО ДАННЫМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ, СООТВЕТСТВЕННО**

337	337
12.1. Введение	337
12.2. Геолого-геофизическая характеристика региона работ.....	339
12.2.1. Магнитотеллурические зондирования.....	340
12.2.2. Сейсмические зондирования	340
12.3. Методика моделирования.....	340
12.4. Прогноз скоростей сейсмических волн по удельному сопротивлению.....	343
12.4.1. Оценка скоростей продольных сейсмических волн	343
12.4.2. Оценка скоростей поперечных сейсмических волн.....	346
12.5. Прогноз удельного сопротивления по сейсмическим скоростям.....	346
12.5.1. Оценка по скоростям продольных сейсмических волн.....	346

12.5.2. Оценка по скоростям поперечных сейсмических волн	348
12.6. Сравнение результатов прогноза	350
12.7. Выводы	351
Литература	352

Глава 13. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРОГНОЗ ОТКРЫТОЙ

ПРИСТОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕ ВНЕ СКВАЖИН	354
13.1. Введение	354
13.2. Геолого-геофизическая характеристика участка	355
13.3. Литолого-стратиграфические данные глубокого бурения и коэффициент открытой пористости	356
13.4. Удельное электрическое сопротивление пород	358
13.4.1. Электромагнитные данные	358
13.4.2. Электрокаротаж	358
13.4.3. Псевдоэлектрокаротаж	360
13.4.4. Оценка удельного сопротивления флюида	360
13.5. Методика прогноза	361
13.6. Прогноз пористости на глубины ниже забоя скважин	362
13.6.1. Варианты прогноза	362
13.6.2. Результаты прогноза	362
13.7. Прогноз пористости в межскважинном пространстве	363
13.7.1. Варианты прогноза	363
13.7.2. Результаты прогноза	364
13.8. Выводы	365
Литература	366

Приложение ЭМПИРИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ, СВЯЗЫВАЮЩИЕ

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ, СКОРОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН И ПОРИСТОСТЬ ПОРОД	368
П.1. Связь электропроводности с пористостью	368
П.1.1. Формула Арчи и ее модификации	368
П.1.2. Формулы для двухфазных сред	370
П.2. Связи сейсмических скоростей с пористостью	372
П.3. Перекрестные связи электропроводности и сейсмических скоростей во влажных породах	372
Литература	374