



Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова  
Геологический факультет

# ГЕОФИЗИКА

Под редакцией В.К. ХМЕЛЕВСКОГО

УЧЕБНИК

Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальностям «Геология», «Геофизика», «Геохимия»,  
«Гидрология и инженерная геология», «Геология и геохимия горючих  
ископаемых», «Экологическая геология»



УНИВЕРСИТЕТ  
КНИЖНЫЙ ДОМ

Москва  
2007

УДК [550.3+550.8](075.8)

ББК 26.2я73-1

Г36

Рецензенты:

Зав. кафедрой общей и прикладной геофизики ун-та «Дубна», проф., д. т. н. *В. Д. Неретин*;  
проф., д. т. н. *В. Н. Бондаренко*

Авторский коллектив:

проф. *Богословский В. А.*, проф. *Горбачев Ю. И.*, ст. н. с. *Жигалин А. Д.*,  
проф. *Калинин А. В.*, доц. *Попов М. Г.*, асс. *Пушкарев П. Ю.*,  
доц. *Модин И. Н.*, проф. *Никитин А. А.*, ст. пр. *Никитин Ан. А.*,  
доц. *Степанов П. Ю.*, проф. *Хмелевской В. К.*

*На обложке — Праховские скалы. Чехия*

**Фото Л. А. Красавиной**

Г36 **Геофизика** : учебник / Под ред. В. К. Хмелевского. — М. : КДУ, 2007. — 320 с.: ил., табл.  
ISBN 978-5-98227-264-5

В книге рассмотрены физико-математические и геологические основы, принципы решения прямых и обратных задач, общие сведения об аппаратуре, технология проведения работы, приемы обработки и интерпретации материалов, области применения фундаментальных, прикладных и скважинных геофизических методов при аэрокосмических, полевых, аквальных, подземных и скважинных работах гравиметрическими, магнитными, электромагнитными, сейсмоакустическими, термическими, ядерно-физическими методами геофизики.

Книга является учебником по геофизике для студентов классических университетов разных геологических специальностей: геология, геофизика, геохимия, гидрогеология и инженерная геология, геология и геохимия горючих ископаемых, экологическая геология. Она может стать пособием для специальностей: геологическая съемка и поиски месторождений полезных ископаемых, геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, геология нефти и газа технических университетов и вузов. Книга может служить справочным руководством по геофизике при использовании ее в разных отраслях науки и производства.

Приказом ректора МГУ В. А. Садовниченко книга включена в серию «Классический университетский учебник».

УДК [550.3+550.8](075.8)

ББК 26.2я73-1

© Коллектив авторов, 2007

© Издательство «КДУ», 2007

ISBN 978-5-98227-264-5

# Оглавление

Предисловие.....	9
Введение .....	10
Методы фундаментальной и прикладной геофизики .....	10
Характеристика физических полей Земли и физических свойств горных пород.....	12
Параметры физических полей.....	12
Физические свойства горных пород.....	12
Особенности технологии геофизических работ .....	13
Обработка и интерпретация геофизических данных.....	13
Информационная модель в геофизике .....	15
Классификации геофизических методов исследования земной коры и их комплексирование .....	16
Классификации геофизических методов.....	16
Комплексирование геофизических методов .....	18
Из истории развития геофизики .....	18
<b>Глава 1. Гравиразведка</b> .....	20
1.1. Основы теории гравиразведки .....	20
1.1.1. Нормальное гравитационное поле Земли .....	20
1.1.2. Аномалии и редукции силы тяжести .....	22
1.1.3. Плотность горных пород .....	24
1.2. Аппаратура для гравиразведки .....	25
1.2.1. Принципы измерения силы тяжести .....	25
1.2.2. Маятниковые приборы .....	26
1.2.3. Гравиметры .....	26
1.3. Методика гравиразведки .....	28
1.4. Интерпретация гравитационных аномалий .....	30
1.4.1. Прямые и обратные задачи гравиразведки .....	30
1.4.2. Геологическая интерпретация данных гравиразведки.....	36
1.4.3. Области применения гравиразведки.....	37
Вопросы для самоконтроля .....	41
<b>Глава 2. Магниторазведка</b> .....	42
2.1. Основы теории геомагнитного поля и магниторазведки .....	42
2.1.1. Элементы геомагнитного поля и его происхождение .....	42
2.1.2. Нормальное и аномальное магнитное поле .....	43
2.1.3. Вариации магнитного поля.....	45
2.1.4. Магнитные свойства горных пород .....	46
2.2. Аппаратура для магниторазведки .....	47
2.2.1. Принципы измерений геомагнитного поля .....	47
2.2.2. Феррозондовые магнитометры .....	47
2.2.3. Протонные магнитометры .....	48
2.2.4. Квантовые магнитометры .....	48
2.2.5. Аппаратура для измерения магнитных свойств горных пород.....	49
2.3. Методика магниторазведки.....	49
2.3.1. Полевая магнитная съемка .....	49
2.3.2. Аэромагнитные и гидромагнитные съемки.....	51
2.3.3. Другие виды магнитных измерений .....	51

2.4. Интерпретация магнитных аномалий .....	52
2.4.1. Прямые и обратные задачи магниторазведки .....	52
2.4.2. Прямая и обратная задачи для вертикального бесконечного стержня (цилиндра) .....	53
2.4.3. Прямая и обратная задачи для вертикального намагниченного шара .....	54
2.4.4. Основные выводы из анализа решений прямых и обратных задач магниторазведки.....	55
2.4.5. Интерпретация данных магниторазведки .....	56
2.4.6. Геологическое истолкование результатов магниторазведки.....	58
2.4.7. Области применения магниторазведки .....	59
Вопросы для самоконтроля .....	62
<b>Глава 3. Электроразведка</b> .....	<b>63</b>
3.1. Физико-математические и геологические основы электроразведки .....	65
3.1.1. Принципы решения прямых задач электроразведки .....	65
3.1.2. Электромагнитные поля, используемые в электроразведке.....	65
3.1.2.1. Естественные переменные электромагнитные поля .....	66
3.1.2.2. Геоэлектрохимические поля .....	67
3.1.2.3. Искусственные постоянные электрические поля .....	69
3.1.2.4. Искусственные переменные гармонические электромагнитные поля .....	71
3.1.2.5. Искусственные импульсные (неустановившиеся) электромагнитные поля .....	72
3.1.2.6. Радиоволновые поля .....	72
3.1.2.7. Импульсные радиолокационные поля.....	73
3.1.2.8. Поле ядерно-магнитной резонансной прецессии (ЯМРП).....	73
3.1.2.9. Пьезоэлектрические поля.....	73
3.1.3. Электромагнитные свойства горных пород .....	74
3.1.3.1. Удельное электрическое сопротивление горных пород .....	74
3.1.3.2. Электрохимическая активность и поляризуемость .....	75
3.1.3.3. Диэлектрическая и магнитная проницаемости.....	75
3.1.3.4. Пьезоэлектрические модули.....	76
3.2. Аппаратура и оборудование для электроразведки.....	77
3.2.1. Общая характеристика применяемых в электроразведке технических средств.....	77
3.2.2. Примеры электроразведочной аппаратуры .....	79
3.3. Методы электроразведки .....	81
3.3.1. Сущность и методика электромагнитных зондирований .....	82
3.3.1.1. Общая характеристика электромагнитных зондирований (ЭМЗ).....	82
3.3.1.2. Электрические зондирования .....	82
3.3.1.3. Зондирование методом вызванной поляризации .....	85
3.3.1.4. Магнитотеллурические методы.....	85
3.3.1.5. Зондирование методом становления поля .....	87
3.3.1.6. Частотные электромагнитные зондирования.....	88
3.3.1.7. Высокочастотные зондирования.....	88
3.3.1.8. Ядерно-магнитное резонансное томографическое зондирование (ЯМР-ТЗ).....	89
3.3.2. Сущность и методика электромагнитных профилирований.....	89
3.3.2.1. Метод естественного электрического поля .....	90
3.3.2.2. Электропрофилирование методом сопротивлений.....	91
3.3.2.3. Электропрофилирование методом вызванной поляризации .....	92
3.3.2.4. Метод переменного естественного электромагнитного поля .....	92
3.3.2.5. Низкочастотное гармоническое профилирование .....	93
3.3.2.6. Метод переходных процессов .....	93

3.3.2.7. Аэроэлектроразведка.....	94
3.3.2.8. Радиоволновое профилирование.....	94
3.3.2.9. Пьезоэлектрические методы.....	95
3.3.3. Подземные методы электроразведки.....	95
3.3.3.1. Геоэлектрохимические методы.....	96
3.3.3.2. Метод заряженного тела (МЗТ) или заряда (МЗ).....	96
3.3.3.3. Индукционное просвечивание.....	97
3.3.3.4. Метод радиоволнового просвечивания.....	97
3.3.3.5. Подземный вариант ПЭМ.....	98
3.4. Интерпретация данных электроразведки и решаемые задачи.....	98
3.4.1. Интерпретация электромагнитных зондирований.....	98
3.4.1.1. Качественная интерпретация.....	98
3.4.1.2. Количественная интерпретация графоаналитическими способами.....	98
3.4.1.3. Палеточные методы интерпретации ЭМЗ.....	99
3.4.1.4. Компьютерная интерпретация кривых ЭМЗ методом подбора.....	100
3.4.1.5. Интерпретация высокочастотных радиоволновых (РВЗ) и радиолокационных (РЛЗ или РЛМ) зондирований.....	101
3.4.2. Результаты геолого-геофизического истолкования данных ЭМЗ.....	102
3.4.3. Интерпретация данных электромагнитного профилирования.....	102
3.4.4. Применение методов электромагнитного профилирования.....	105
3.4.5. Интерпретация и области применения подземных методов электроразведки.....	108
Вопросы для самоконтроля.....	108
<b>Глава 4. Сейсморазведка.....</b>	<b>109</b>
4.1. Общие сведения о сейсморазведке.....	109
4.2. Физические и геологические основы сейсморазведки.....	111
4.2.1. Основы теории упругости.....	111
4.2.2. Упругие волны в безграничных средах.....	112
4.2.3. Упругие волны в слоистых средах.....	117
4.2.4. Особенности распространения сейсмических волн в реальных средах.....	122
4.2.4.1. Скорости сейсмических волн.....	122
4.2.4.2. Поглощение упругих волн.....	124
4.2.4.3. Зона малых скоростей.....	125
4.2.4.4. Типы скоростей в слоистых средах.....	126
4.2.4.5. Типы сейсмических границ.....	127
4.2.4.6. Обоснование сейсмических методов разведки.....	129
4.2.4.7. Волны-помехи.....	131
4.3. Сейсморазведочная аппаратура.....	132
4.3.1. Источники упругих волн.....	132
4.3.2. Приемники упругих волн.....	134
4.3.3. Интерференционные системы приема и возбуждения упругих волн.....	136
4.3.4. Сейсмостанции.....	137
4.4. Методика и системы наблюдений.....	139
4.4.1. Метод отраженных волн.....	139
4.4.1.1. Прямые кинематические задачи метода отраженных волн при общем пункте возбуждения (ОПВ).....	139
4.4.1.2. Кинематика кратных отраженных волн.....	142
4.4.1.3. Наблюдения по методу общей глубинной точки.....	143
4.4.1.4. Системы наблюдений в методе отраженных волн.....	144
4.4.2. Метод преломленных (головных) волн.....	146
4.4.2.1. Прямые кинематические задачи метода преломленных волн.....	146
4.4.2.2. Системы наблюдений в методе преломленных волн.....	148
4.4.2.3. Методика полевых наблюдений МПВ.....	149

4.5. Обработка и интерпретация данных сейсморазведки .....	150
4.5.1. Интерпретационные модели в сейсморазведке .....	150
4.5.2. Обработка сейсмограмм .....	151
4.5.3. Обработка и интерпретация данных метода отраженных волн .....	152
4.5.4. Интерпретация данных метода преломленных волн .....	154
4.6. Применение сейсморазведки для решения различных геологических задач .....	155
4.6.1. Сейсморазведка при поисках углеводородов .....	155
4.6.2. Малоглубинная (инженерная) сейсморазведка .....	158
4.6.3. Сейсморазведка при решении рудных задач .....	160
4.6.4. Глубинные сейсмические исследования .....	161
Вопросы для самоконтроля .....	162
<b>Глава 5. Терморазведка .....</b>	<b>163</b>
5.1. Физико-геологические основы терморазведки .....	163
5.1.1. Тепловое поле Земли и его параметры .....	163
5.1.2. Региональный и локальный тепловые потоки в земной коре .....	165
5.1.3. Принципы теории терморазведки .....	165
5.1.4. Тепловые и оптические свойства горных пород .....	167
5.2. Методы терморазведки .....	168
5.2.1. Аппаратура для геотермических исследований .....	168
5.2.2. Радиотепловые и инфракрасные съемки .....	169
5.2.3. Региональные геотермические исследования .....	169
5.2.4. Поисково-разведочные геотермические работы .....	171
5.2.5. Применение терморазведки для изучения геологической среды .....	172
Вопросы для самоконтроля .....	172
<b>Глава 6. Ядерная геофизика .....</b>	<b>174</b>
6.1. Физико-химические и геологические основы ядерной геофизики .....	174
6.1.1. Общие сведения о радиоактивности .....	174
6.1.2. Взаимодействие радиоактивных излучений с окружающей средой .....	176
6.2. Радиоактивность горных пород и руд .....	177
6.2.1. Методы определения и содержание радиоактивных элементов в земной коре .....	177
6.2.2. Радиоактивность минералов .....	178
6.2.3. Радиоактивность горных пород, руд, вод и газов .....	178
6.3. Ядерно-физические свойства горных пород и руд .....	179
6.3.1. Общая характеристика ядерно-физических свойств горных пород и руд .....	179
6.3.2. Гамма-лучевые свойства горных пород и руд .....	180
6.3.3. Нейтронные свойства горных пород и руд .....	180
6.4. Аппаратура и методы, применяемые в ядерной геофизике .....	181
6.4.1. Аппаратура для ядерно-геофизических исследований .....	181
6.4.2. Радиометрические методы разведки .....	183
6.4.2.1. Основные понятия радиометрии .....	183
6.4.2.2. Аэрогамма-съемка .....	183
6.4.2.3. Автогамма-съемка .....	184
6.4.2.4. Пешеходная гамма-съемка .....	185
6.4.2.5. Глубинная гамма-съемка .....	186
6.4.2.6. Задачи гамма- и гамма-спектрометрической съемки .....	186
6.4.2.7. Эманационная съемка .....	186
6.4.2.8. Метод подземной регистрации космических излучений .....	187
6.4.2.9. Определение абсолютного возраста пород .....	188
6.5. Ядерно-физические методы .....	188
6.5.1. Общая характеристика ядерно-физических (радиоизотопных) методов .....	188
6.5.2. Радиоизотопные гамма-методы .....	189
6.5.3. Радиоизотопные нейтронные методы .....	189
Вопросы для самоконтроля .....	190

<b>Глава 7. Геофизические исследования скважин</b> .....	191
7.1. Общие положения .....	191
7.1.1. Некоторые сведения из истории ГИС .....	191
7.1.2. Керн и ГИС.....	192
7.1.3. Характеристика скважины как объекта исследования.....	192
7.1.4. Классификация методов, решаемые задачи и схема установки ГИС.....	194
7.2. Методы электрометрии.....	195
7.2.1. Каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации.....	195
7.2.2. Каротаж потенциалов вызванной поляризации .....	200
7.2.3. Удельное электрическое сопротивление водных растворов и горных пород.....	201
7.2.4. Каротаж сопротивления нефокусированными зондами.....	203
7.2.5. Каротаж сопротивления фокусированными зондами — боковой каротаж .....	206
7.2.6. Индукционный каротаж .....	208
7.2.7. Диэлектрический каротаж .....	210
7.2.8. Микрокаротаж.....	211
7.3. Методы радиометрии скважин .....	212
7.3.1. Основные блоки аппаратуры для РК.....	213
7.3.2. Гамма-каротаж.....	214
7.3.3. Гамма-гамма-каротаж .....	216
7.3.4. Рентгенорадиометрический каротаж.....	218
7.3.5. Нейтронный каротаж.....	218
7.3.6. Импульсный нейтронный каротаж.....	221
7.3.7. Ядерно-магнитный каротаж.....	222
7.4. Сейсмоакустические методы .....	224
7.4.1. Общая характеристика сейсмоакустических методов .....	224
7.4.2. Акустический каротаж .....	224
7.4.3. Акустический каротаж на отраженных волнах .....	229
7.4.4. Вертикальное сейсмическое профилирование .....	230
7.5. Термические и магнитные методы .....	231
7.5.1. Термический каротаж .....	231
7.5.2. Магнитный каротаж.....	234
7.6. Исследование скважин в процессе бурения .....	237
7.6.1. Методы, основанные на использовании буровой техники.....	237
7.6.2. Газовый каротаж.....	239
7.6.3. Исследование каменного материала .....	240
7.7. Изучение технического состояния скважин .....	242
7.7.1. Инклинометрия .....	242
7.7.2. Кавернометрия и профилометрия.....	244
7.8. Комплексное применение методов ГИС .....	246
7.8.1. Нефтегазовые месторождения .....	246
7.8.2. Угольные и рудные месторождения .....	251
Вопросы для самоконтроля .....	252
<b>Глава 8. Комплексование геофизических методов</b> .....	254
8.1. Понятие о геофизическом комплексе.....	254
8.2. Физико-геологическая модель.....	255
8.2.1. Определение физико-геологической модели.....	255
8.2.2. Формирование и типы ФГМ.....	256
8.2.3. Условия эффективного применения геофизических методов .....	256
8.3. Неоднозначность решения обратных задач геофизики .....	258
8.3.1. Качественная неоднозначность по определению природы геофизических аномалий .....	258

8.3.2. Количественная неоднозначность при решении обратных задач .....	259
8.3.3. Сужение пределов неоднозначности.....	260
8.4. Комплексная интерпретация геофизических данных .....	261
8.4.1. Комплексный анализ геофизических данных.....	262
8.4.2. Количественная комплексная интерпретация геофизических данных с помощью регрессионного анализа .....	263
8.4.3. Геологическая интерпретация комплексных геофизических данных .....	264
8.4.3.1. Оценка морфологии объектов.....	264
8.4.3.2. Оценка мощности и глубины залегания объектов.....	265
8.4.3.3. Оценка вещественного состава .....	265
8.4.3.4. Оценка возраста объектов .....	265
8.5. Выбор геофизического комплекса .....	266
8.5.1. Основные принципы выбора комплекса .....	266
8.5.2. Условия формирования геофизического комплекса .....	267
8.5.3. Виды комплексов геофизических методов.....	267
8.6. Основы петрофизики .....	269
8.6.1. Петрофизика и геофизические свойства горных пород .....	269
8.6.2. Геолого-гидрогеологические и деформационно-прочностные свойства.....	269
8.6.3. Методика измерений физических свойств горных пород .....	272
8.6.4. Взаимосвязи петрофизических свойств горных пород .....	272
8.6.5. Петрофизические карты .....	272
Вопросы для самоконтроля .....	273
<b>Глава 9. Научно-практическое применение геофизики .....</b>	<b>274</b>
9.1. Глубинная геофизика и основы физики Земли .....	274
9.1.1. Методы глубинной геофизики .....	274
9.1.2. Строение Земли по геофизическим данным .....	275
9.2. Региональная геофизика .....	279
9.2.1. Методы региональной глубинной и структурной геофизики.....	279
9.2.2. Региональные картировочно-поисковые крупномасштабные геофизические исследования.....	282
9.3. Поиски и разведка полезных ископаемых геофизическими методами .....	284
9.3.1. Физико-геологические модели объектов поисков как основа геофизических поисков и разведки твердых полезных ископаемых.....	284
9.3.2. Нефтегазовая геофизика .....	286
9.3.3. Рудная геофизика .....	289
9.3.4. Нерудная и угольная геофизика.....	291
9.4. Инженерная геофизика .....	294
9.4.1. Геофизические методы исследования геологической среды .....	294
9.4.2. Гидрогеологическая и почвенно-мелиоративная геофизика.....	295
9.4.3. Инженерно-геологическая и горная геофизика.....	297
9.4.4. Мерзлотно-гляциологическая геофизика .....	300
9.4.5. Техническая и археологическая геофизика .....	302
9.5. Экологическая и медицинская геофизика .....	304
9.5.1. Экологическая геофизика и геофизическая экология.....	304
9.5.2. Эколого-геофизические исследования и мониторинг геодинамических природных и техногенных процессов .....	306
9.5.3. Эколого-геофизические исследования и мониторинг вещественного (химического или геохимического) загрязнения окружающей среды .....	308
9.5.4. Техногенное физическое загрязнение.....	309
9.5.5. Медицинская геофизика .....	313
Вопросы для самоконтроля .....	318
<b>Список учебников и учебных пособий.....</b>	<b>319</b>



## Предисловие

**Геофизика** — наука, которая занимается исследованием Земли, ее оболочек, природной геологической среды как источника существования биоты и человека, поиском и разведкой полезных ископаемых путем изучения физических полей Земли, как естественных, так и искусственно созданных. Находясь на стыке всех наук о Земле, а также математики, физики, химии и биологии, она привносит в них косвенную геофизическую информацию и, в свою очередь, получает от них прямые приемы решения собственных проблем.

*Фундаментальные направления* геофизики теоретически обосновывают природу, теорию и технологию изучения различных физических полей, естественных (гравитационного, геомагнитного, электромагнитного, сейсмоакустического, теплового, ядерного излучений) или искусственных, техногенных или специально создаваемых (упругих, электромагнитных, ядерных облучений и др.).

Большое практическое значение имеют *прикладные направления* геофизики, связанные с изучением климата, погоды, разведкой полезных ископаемых, изучением условий жизни и здоровья человека, зависящих от физических полей Земли и космоса.

Данный учебник посвящен в основном геофизическим методам исследования недр и окружающей геолого-геофизической среды. В работу вошли расширенные, обновленные и переработанные разделы кратких учебников и учебных пособий по общей и разведочной геофизике, изданных преподавателями-геофизиками геологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова за 40 лет (см. список учебников и учебных пособий, № 3–6, 9, 10, 12–14). Большинство их авторов являются также соавторами данного учебника: проф. В. А. Богословский (гл. 9), проф. Ю. И. Горбачев (гл. 7), ст. н. с. А. Д. Жигалин (гл. 9), проф. А. В. Калинин (гл. 4), доц. М. Г. Попов (гл. 1, 2), асс. П. Ю. Пушкарев (гл. 3, 5), доц. И. Н. Модин (гл. 9), проф. А. А. Никитин (гл. 8), ст. пр. Ан. А. Никитин (гл. 7, 8), доц. П. Ю. Степанов (гл. 4, 7), проф. В. К. Хмелевской (предисловие, введение, гл. 3, 5, 6, 8, 9, научное редактирование книги).

При подготовке книги к изданию большую помощь оказали Е. Б. Ильина и В. В. Кузьмина, за что авторы им искренне благодарны.

Авторы благодарят рецензентов, профессоров В. Д. Неретина и В. М. Бондаренко, за труд по изучению книги и внесение в нее существенных замечаний и поправок.