

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	15
Preface	17
Введение	19
Глава 1. Ледники как объекты радиогляциологических исследований ...	25
1.1. Классификация ледников	25
1.1.1. Морфологическая классификация	25
1.1.2. Геофизическая классификация	27
1.2. Зоны льдообразования на ледниках и их гидротермический режим	30
1.3. Географическое распределение ледников разных типов	33
1.4. Особенности строения и режима субполярных и теплых ледников	36
Глава 2. Распространение электромагнитных волн в однородных средах	37
2.1. Макроскопические электрические параметры среды	37
2.2. Уравнения радиолокации	39
2.1.1. Поверхностные цели	40
2.2.2. Подповерхностные цели	42
2.2.3. Многократные отражения от поверхности	44
2.2.4. Многократные отражения от ложа ледника	45
Глава 3. Электрофизические свойства компонентов ледников	46
3.1. Физические свойства	46
3.2. Электрические свойства	47
3.2.1. Лед	48
3.2.2. Вода	60
3.2.3. Горные породы	64
3.2.4. Смеси диэлектриков	66
3.2.5. Сухой снег, фирн и ледниковый лед	73

3.2.6. Влажный снег, фирн и ледниковый лед	75
3.2.7. Мореносодержащий лед	76

Глава 4. Распространение радиоволн в ледниках	78
4.1. Скорость распространения радиоволн	78
4.1.1. Возможный диапазон изменения средней скорости радиоволн в ледниках	79
4.1.2. Натурные данные	81
4.2. Удельное поглощение радиоволн в ледниках	85
4.3. "Нормальное" суммарное ослабление донных сигналов	86
4.4. Дополнительные факторы ослабления донных сигналов и их количественная оценка	90
4.4.1. Вода на поверхности и у ложа	90
4.4.2. Промоченный водой слой снега и фирна	95
4.4.3. Внутренняя слоистость	95
4.4.4. Шероховатость поверхности и ложа	98
4.4.5. Изменение состава и влажности пород ложа	103
4.4.6. Поляризационные потери	105
4.5. Экспериментальные исследования суммарного и дополнительного ослабления донных сигналов и максимальная глубина зондирования субполярных и теплых ледников	106
4.6. Рассеяние на внутрiledниковых неоднородностях	112
4.6.1. Рассеяние на включениях, много меньших длины волны	112
4.6.2. Рассеяние на включениях, соизмеримых с длиной волны	115
4.7. Отражение от внутренних слоев и горизонтов	119
4.7.1. Отражение от диэлектрически контрастных границ и слоев	121
4.7.2. Отражение от слоев льда разной плотности	125
4.7.3. Отражение от слоев льда с разными анизотропными свойствами	126
4.7.4. Отражение от «кислотных» слоев	126
4.7.5. Отражение от рассеивающих горизонтов	128
Глава 5. Аппаратура для радиолокационного зондирования ледников	130
5.1. Построение локаторов для зондирования ледников	131
5.2. Локаторы для зондирования холодных ледниковых покровов	133
5.3. Импульсные локаторы и их основные характеристики	135
5.4. Моноимпульсные локаторы	140
5.5. Локатор с синтезированной частотой	141
5.6. Локаторы для зондирования теплых ледников	141

5.6.1. Импульсный локатор DENV дециметрового диапазона	141
5.6.2. Моноимпульсные локаторы декаметрового диапазона	142
5.7. Локаторы для зондирования горных ледников	142
5.8. Локаторы для зондирования субполярных и политермических ледников	143
5.9. Специализированные локаторы	147
5.9.1. Локаторы для радиофизических исследований	147
5.9.2. Короткоимпульсные “ледовые” локаторы	147
5.10. “Снежные” локаторы и промышленные георадары	147
5.11. Системы регистрации радарных и навигационных данных	148
5.11.1. Аналоговые системы	148
5.11.2. Цифровые системы	151
5.12. Локаторы, применявшиеся в экспедициях Института географии РАН	153
5.12.1. Вертолетный локатор РЛС-620	156
5.12.2. Портативный локатор ТГУ	159
5.12.3. Локатор метрового диапазона МПИ-60 (АРС-4)	160
5.12.4. Низкочастотный локатор МПИ-8	161
5.12.5. Локаторы ВИРЛ	162

Глава 6. Методика измерений, обработка и интерпретация данных радиозондирования

6.1. Толщина льда и подледный рельеф	170
6.2. Выделение сигналов от ложа и классификация отражений	171
6.2.1. Выделение сигналов от ложа при дискретных наземных измерениях	171
6.2.2. Классификация отражений при воздушных измерениях ...	176
6.3. Измерение времени запаздывания сигналов на радарных записях	176
6.3.1. Аналоговые записи	176
6.3.2. Цифровые записи	178
6.4. Построение разрезов и профилей толщины льда и подледного рельефа	170
6.4.1. “Геометрические” методы преобразования временных записей	179
6.4.2. Преобразования Харрисона	181
6.4.3. Графические методы построения разрезов	182
6.4.4. Воздушные измерения	186
6.4.5. Общее решение двумерной обратной задачи радиозондирования	187
6.4.6. Алгоритм решения двумерной обратной задачи	189
6.4.7. Опробование программы ОЗР-1 на теоретических моделях	191

6.4.8. Область применения надирного метода при аэрозондировании	193
6.4.9. Пример применения программы ОЗР-1	194
6.4.10. Построение разрезов по данным двухпозиционных измерений	195
6.4.11. Обработка и интерпретация цифровых радарных записей	198
6.4.12. Процедура миграции	198
6.5. Точность измерений толщины льда и высоты ложа	204
6.5.1. Наземные измерения	205
6.5.2. Аэрозондирование	210
6.5.3. Геопривязка точек измерений толщины льда на аналоговых Z-записях	212
6.5.4. Разрешение радарных данных	213
6.6. Построение карт толщины льда и подледного рельефа ледников	213
6.6.1. Построение карт по данным одно- и двухпозиционных измерений	213
6.6.2. “Стандартные” методы построения карт	216
6.7. Скорость распространения радиоволн в ледниках	218
6.7.1. Сравнение данных радиозондирования и бурения	218
6.7.2. Радиолокационный каротаж скважин	219
6.7.3. Наклонное радиозондирование	220
6.7.4. Влияние слоя фирна на скорость распространения радиоволн в холодных ледниках	226
6.7.5. Гиперболические отражения	231
6.8. Коэффициент отражения и удельное поглощение	240
6.9. Изменение отражающих свойств ложа	243
6.10. Гидротермическое состояние ледников	245
6.10.1. Количественные и качественные методы оценки	245
6.10.2. Скорость распространения радиоволн	246
6.10.3. Удельное поглощение и коэффициент отражения ложа ..	246
6.10.4. Информативность съемки подледного ложа	247
6.10.5. Радиолокационные отражения на аналоговых записях и их классификация	247
6.10.6. Природа внутренних отражений	251
6.10.7. Интерпретация внутренних отражений	252
6.10.8. Интерпретация придонных отражений	258
6.10.9. Интерпретация промежуточных отражений	260
6.10.10. Интерпретация квазигиперболических отражений	260
6.10.11. Комплексная итерпретация подповерхностных отражений	261

6.11. Оценка физических параметров ледников по данным радиозондирования	262
6.11.1. Плотность снежно-фирновой и ледяной толщи холодных ледников	262
6.11.2. Содержание воды в теплых, субполярных и политермических ледниках	262
6.11.3. Точность определения плотности и абсолютного содержания воды	265
6.12. Объем ледников	266
6.12.1. Ледниковые купола	267
6.12.2. Горные ледники	270
6.13. Оценка запасов льда в ледниковых системах	275

Глава 7. Строение и режим ледников по данным радиозондирования 277

7.1. Районы исследований, аппаратура и методика измерений	277
7.2. Толщина льда, подледный рельеф и внутреннее строение	281
7.2.1. Горные ледники	281
Полярный Урал	281
Кавказ	285
Заилийский Алатау	286
Джунгарский Алатау	287
Тянь-Шань	288
Памиро-Алай	289
Шпицберген	289
Камчатка	295
Пиренеи	297
7.2.2. Сетчатое оледенение	297
7.2.3. Ледниковые купола и выводные ледники	300
Северо-Восточная Земля	301
Земля Франца-Иосифа	302
Северная Земля	305
Остров Кинг-Джордж	307
Остров Ливингстон	311
7.3. Объем ледников и запасы льда в ледниковых системах	311
7.3.1. Объем ледников	311
7.3.2. Корреляционные соотношения между площадью и объемом ледников	311
7.3.3. Запасы льда в ледниковых системах	315
7.3.4. Изменение объема льда на Земле Франца-Иосифа за последние 40 лет	320
7.3.5. Максимальная толщина ледников	321
7.4. Внутреннее строение, гидротермическое состояние и режим	322

7.4.1. Электрофизические параметры ледниковой толщи и ложа	323
7.4.2. Гидротермическое состояние ледников Шпицбергена	323
7.4.3. Содержание воды в теплых, субполярных и двухслойных ледниках	323
7.4.4. Пространственные вариации содержания воды в двухслойных ледниках	329
7.4.5. Сезонные вариации содержания воды в двухслойных ледниках	330
7.4.6. Изменение содержания воды по глубине двухслойных ледников	333
7.4.7. Связь пространственных вариаций содержания воды с интенсивностью поверхностного таяния	335
7.4.8. Связь сезонных вариаций содержания воды с интенсивностью поверхностного таяния	336
7.4.9. Внутрiledниковый сток из двухслойных ледников	337
7.4.10. Связь гидротермического состояния ледников Шпицбергена с их режимом и динамикой	338
Заключение	340
Литература	344
Приложение А	377
Приложение Б	383
Resume	386