

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	9
ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ ОТ РЕДАКТОРА	11
ОБ АВТОРАХ	13
БЛАГОДАРНОСТИ.....	15
ПОСВЯЩЕНИЕ	16
ЧАСТЬ I. ВВЕДЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ	17
ГЛАВА 1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОПИСАНИЕ	20
1.1. ВВЕДЕНИЕ	20
1.2. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТЕРМИНЫ, ВОЗНИКШИЕ В РОССИИ.....	24
1.3. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ	25
1.4. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД	26
1.5. КОНДУКЦИЯ, КОНВЕКЦИЯ И АДВЕКЦИЯ.....	26
1.6. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ	27
1.7. ИНДЕКС КОНТИНЕНТАЛЬНОСТИ.....	32
1.8. ДВИЖЕНИЕ ВЛАГИ В АКТИВНОМ СЛОЕ ВО ВРЕМЯ ПРОМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ.....	33
1.9. УСЛОВИЯ УВЛАЖНЕНИЯ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ.....	34
1.10. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ВЛАГИ.....	36
1.11. ПРОЧНОСТЬ ЛЬДА.....	38
1.12. КРИОСОЛИ, ГЕЛИСОЛИ И ЛЕПТОСОЛИ	39
1.13. ФРАГИПАНЫ	39
1.14. ЗАСОЛЕННОСТЬ В РАЙОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ	41
1.15. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО	45
1.16. МИКРООРГАНИЗМЫ В ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЕ	47
1.16.1. Антарктическая вечная мерзлота.....	47
1.16.2. Вечная мерзлота высоких широт	48
1.16.3. Вечная мерзлота в горных областях Китая	50
1.16.4. Фенотипические черты	51
1.16.5. Связь с изменением климата на Тибетском плато	52
1.17. ГАЗ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ.....	53
1.18. ТЕРМОКАРСТ.....	55
1.19. ВЕЧНАЯ МЕРЗЛОТА ПРИБРЕЖНЫХ ОБЛАСТЕЙ	56
ГЛАВА 2. КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ НИЖЕ 0 °С.....	59
2.1. ВВЕДЕНИЕ	59
2.2. ПРИРОДА ЛЬДА И ВОДЫ.....	59
2.3. ВЛИЯНИЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ПРОМЕРЗАНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД.....	65
2.4. ПРОМЕРЗАНИЕ И ОТТАИВАНИЕ АКТИВНОГО СЛОЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В РАВНОВЕСИИ С КЛИМАТОМ	66
2.5. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МИНЕРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ ГЛИНИСТОЙ ФРАКЦИИ И ПОЛОЖЕНИЕМ КРОВЛИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ	68

2.6. ОГИБАЮЩИЕ ТЕМПЕРАТУР ГОРНЫХ ПОРОД.....	69
2.7. ИГОЛЬЧАТЫЙ ЛЕД.....	72
2.8. МОРОЗНОЕ ПУЧЕНИЕ.....	74
2.9. УПЛОТНЕНИЕ И ОСАДКА ПРИ ОТТАИВАНИИ.....	75
2.10. КРИОСТРАТИГРАФИЯ, КРИОСТРУКТУРЫ, КРИОТЕКСТУРЫ И КРИОФАЦИИ.....	76
2.11. МОРОЗОБОЙНОЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ.....	77
2.12. ДИЛАТАЦИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ.....	79
2.13. ПУЧИННОСТЬ ГРУНТОВ.....	79
2.14. КРИОТУРБАЦИИ, ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИНЪЕКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ.....	80
2.14.1. Криотурбации.....	80
2.14.2. Восходящие инъекции.....	84
2.14.3. Внедрения.....	84
2.15. ВЫПУЧИВАНИЕ ОБЪЕКТОВ.....	86
2.16. ПОВОРАЧИВАНИЕ ОБЪЕКТОВ.....	87
2.17. СОРТИРОВКА.....	88
2.18. ВЫВЕТРИВАНИЕ И МОРОЗНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ.....	89
2.19. КАРСТ В РАЙОНАХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ.....	94
2.20. ПЛОТНОСТЬ И СОЛЕННОСТЬ МОРСКОЙ ВОДЫ.....	96
ГЛАВА 3. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД.....	100
3.1. ВВЕДЕНИЕ.....	100
3.2. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ.....	100
3.2.1. Баланс тепла на поверхности Земли и его влияние на климат.....	100
3.2.2. Взаимосвязь между температурами воздуха и температурами горных пород.....	107
3.2.3. Температурная сдвижка.....	108
3.2.4. Связь с воздушными массами.....	112
3.2.5. Атмосферные осадки.....	114
3.2.6. Широта и долгота.....	118
3.2.7. Топография и высота.....	120
3.2.8. Сток холодного воздуха.....	122
3.2.9. Буферизация температуры в горных долинах.....	122
3.3. ЛАНДШАФТНЫЕ ФАКТОРЫ.....	123
3.3.1. Растительность.....	123
3.3.2. Гидрологические и гидрогеологические условия.....	126
3.3.3. Водоемы.....	128
3.3.4. Влияние дисперсных и скальных пород.....	131
3.3.5. Пожары.....	131
3.3.6. Ледники.....	133
3.3.7. Воздействие человека.....	136
ГЛАВА 4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ТОЛЩ.....	137
4.1. ВВЕДЕНИЕ.....	137
4.2. ЗОНАЛЬНОСТЬ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД.....	139
4.3. КАРТИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД.....	142
4.4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ.....	143
4.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ТОЛЩ.....	145
4.6. ПРОГРЕСС В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....	146
4.7. ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ, ВЛИЯЮЩЕЙ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ КАРТ.....	146
4.8. КАРТЫ МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЙ, ОСНОВАННЫЕ НА ДАННЫХ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	150

4.8.1. Мощность многолетнемерзлых толщ.....	150
4.8.2. Карты льдистости.....	150
4.8.3. Водные ресурсы вечной мерзлоты.....	151
4.8.4. Общее содержание углерода.....	154
4.9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И АЭРОСЪЕМКИ.....	155
4.10. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА: ЗОНА ОПАСНОСТИ.....	155
4.11. КЛАССИФИКАЦИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОЙ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ... ..	158
ЧАСТЬ II . КРИОГЕННЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА.....	160
ВВЕДЕНИЕ.....	160
ГЛАВА 5. МОРОЗОБОЙНЫЕ ТРЕЩИНЫ, ЛЕДЯНЫЕ ЖИЛЫ, ПЕСЧАНЫЕ, ЛЕССОВЫЕ И СКАЛЬНЫЕ ТЕССЕЛЛОНЫ.....	163
5.1. ВВЕДЕНИЕ.....	163
5.2. ПЕРВИЧНЫЕ И ВТОРИЧНЫЕ ЖИЛЫ (ТЕССЕЛЛОНЫ).....	167
5.2.1. Первичные жилы.....	167
5.2.1.1. Ледяные жилы.....	167
5.2.1.2. Песчаные тесселлоны.....	179
5.2.1.3. Лёссовые тесселлоны.....	181
5.2.1.4. Каменные тесселлоны.....	182
5.2.2. Вторичные жилы.....	182
5.2.2.1. Касты (псевдоморфозы) по ледяным жилам.....	183
5.2.2.2. Грунтовые жилы.....	183
ГЛАВА 6. ЗАЛЕЖЕОБРАЗУЮЩИЕ ЛЬДЫ НА НИЗМЕННОСТЯХ.....	187
6.1. ВВЕДЕНИЕ.....	187
6.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАЛЕЖЕОБРАЗУЮЩИХ ЛЬДОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ.....	189
6.3. ИСТОЧНИКИ ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА.....	189
6.4. ДЕГЛЯЦИАЦИЯ ЛАВРЕНТИЙСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ЩИТА.....	191
6.5. МЕТОДЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЗАЛЕЖЕОБРАЗУЮЩИХ ЛЬДОВ.....	192
6.6. ЗАЛЕЖЕОБРАЗУЮЩИЕ ЛЬДЫ, ПРЕДПОЛОЖИТЕЛЬНО ОБРАЗОВАННЫЕ ЗА СЧЕТ МИГРАЦИИ ВОДЫ К ФРОНТУ ПРОМЕРЗАНИЯ.....	193
6.7. ЗАЛЕЖЕОБРАЗУЮЩИЕ ЛЬДЫ, ПРЕДПОЛОЖИТЕЛЬНО ЯВЛЯЮЩИЕСЯ ПОГРЕБЕННЫМИ ЛЕДНИКОВЫМИ ЛЬДАМИ.....	194
6.8. ДРУГИЕ ТЕОРИИ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЗАЛЕЖЕОБРАЗУЮЩИХ ЛЬДОВ.....	196
6.9. ЛЕДОВЫЙ КОМПЛЕКС, ВКЛЮЧАЯ ОТЛОЖЕНИЯ ЕДОМЫ.....	196
6.10. УСЛОВИЯ РОСТА МОЩНЫХ ЛЕДЯНЫХ ЖИЛ.....	197
6.11. МЕХАНИЧЕСКОЕ УСЛОВИЕ РОСТА ЛЕДЯНЫХ ЖИЛ И ЕГО СВЯЗЬ СО СВОЙСТВАМИ ВМЕЩАЮЩИХ ОТЛОЖЕНИЙ.....	200
6.12. ПЛАВУЧЕСТЬ ЗАЛЕЖЕОБРАЗУЮЩИХ ЛЬДОВ.....	201
6.13. РЕЗЮМЕ. ИДЕИ, ОБЪЯСНЯЮЩИЕ ЭВОЛЮЦИЮ ЕДОМЫ.....	202
6.14. НАЛЕДИ.....	203
6.15. МНОГОЛЕТНИЕ ЛЕДЯНЫЕ ПЕЩЕРЫ.....	206
6.16. ТИПЫ ЛЬДА, НАЙДЕННОГО В МНОГОЛЕТНИХ ЛЕДЯНЫХ ПЕЩЕРАХ.....	208
6.17. ПРОЦЕССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ.....	210
6.18. ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ.....	211
6.18.1. Многолетние ледяные пещеры с глубокими отверстиями.....	211
6.18.2. Наклонные пещеры с двумя входами.....	213
6.18.3. Многолетние ледяные пещеры с одним входом и системой трещин в коренных породах, через которые поступает воздух.....	213

6.18.4. Многолетние ледяные пещеры с единственным входом без дополнительных источников охлаждения	214
6.19. ЛЕДЯНЫЕ ПЕЩЕРЫ В СУБТРОПИЧЕСКОМ КЛИМАТЕ	215
6.20. МАССИВНЫЕ ГЛЫБЫ ЛЬДА В СКАЛЬНЫХ ИЛИ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОДАХ	217
ГЛАВА 7. МНОГОЛЕТНИЕ БУГРЫ ПУЧЕНИЯ	219
7.1. ВВЕДЕНИЕ	219
7.2. БУГРЫ ДИАМЕТРОМ БОЛЕЕ 2,5 м	220
7.2.1. Бугры, сформированные преимущественно из инъекционного льда	222
7.2.1.1. Бугры пинго	222
7.2.1.2. Гидростатические пинго	223
7.2.1.3. Гидравлические пинго	224
7.2.1.4. Пинго с плоской поверхностью	228
7.2.1.5. Сезонные (осциллирующие) бугры пучения	231
7.2.1.6. Наледные бугры	232
7.2.1.7. Многолетние бугры неопределённого происхождения	233
7.2.1.8. «Псевдоинъекционные» бугры	233
7.2.2. Бугры, образовавшиеся преимущественно в результате сегрегационного льдовыделения	234
7.2.2.1. Пальсы	235
7.2.2.2. Пальсы в морском климате	236
7.2.2.3. Пальсы в холодном континентальном климате	239
7.2.2.4. Литальсы	243
7.2.2.5. Похожие на пальсы и литальсы формы рельефа	247
7.2.3. Бугры, образованные скоплением льда в торфяных плато	248
7.3. КРИОГЕННЫЕ БУГРЫ МЕНЕЕ 2,5 м В ДИАМЕТРЕ	253
7.3.1. Осциллирующие кочки	256
7.3.2. Туфуры	260
7.3.3. Циклические пылеватые кочки	263
7.3.4. Нивально-золотые кочки	264
7.3.5. Кочки неясного происхождения	266
7.3.6. Шнурковые болота	266
7.3.7. Пуны	267
ГЛАВА 8. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА	269
8.1. ВВЕДЕНИЕ	269
8.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	269
8.3. МЕДЛЕННЫЕ ПОТОКИ	271
8.3.1. Криогенный крип	271
8.3.1.1. Крип за счёт игольчатого льда	272
8.3.1.2. Морозное пучение и морозный крип	274
8.3.1.3. Гелифлюкция	277
8.3.1.4. Вклад других, похожих на крип процессов в перемещение отложений вниз по склону	280
8.3.2. Формы рельефа, образующиеся криогенными медленными потоками в гумидных областях	282
8.3.3. Формы рельефа, формирующиеся криогенным крипом в аридных регионах	286
8.4. БЫСТРЫЕ КРИОГЕННЫЕ ПОТОКИ	288
8.4.1. Криогенные обломочные потоки (сели)	289
8.4.2. Криогенные оползни и оплывины	297
8.4.3. Сложные криогенные склоновые явления	299
8.4.3.1. Сплывы активного слоя	300
8.4.3.2. Ретрогрессивные оплывины при оттаивании	301
8.4.3.3. Снежные и слякотные лавины	306
8.4.3.4. Снежные лавины	306
8.4.3.5. Слякотные лавины	310

8.5. ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОБЛОМКОВ ВНИЗ ПО СКЛОНУ В ГОРНЫХ ОБЛАСТЯХ.....	313
ГЛАВА 9. ФОРМЫ РЕЛЬЕФА, СОСТОЯЩИЕ ИЗ КРУПНООБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА.....	314
9.1. ВВЕДЕНИЕ	314
9.2. ИСТОЧНИК МАТЕРИАЛА	314
9.3. ВЛИЯНИЕ ТИПА ГОРНОЙ ПОРОДЫ	316
9.4. ПРОДУКТЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ	317
9.5. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЫВЕТРИВАНИЕ	318
9.6. СУДЬБА РАСТВОРИМЫХ СОЛЕЙ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ХИМИЧЕСКОГО И БИОЛОГИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ.....	319
9.7. СКОРОСТЬ ОТСТУПАНИЯ СКАЛЬНЫХ ОБРЫВОВ	320
9.8. ФОРМЫ РЕЛЬЕФА, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ ПРИ АККУМУЛЯЦИИ ОБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ХОЛОДНОМ КЛИМАТЕ	320
9.8.1. Криогенные блоковые (каменные) поля.....	321
9.8.1.1. Измерение скорости движения обломков на склонах.....	323
9.8.2. Криогенные осыпные склоны и конуса выноса	324
9.8.3. Классификация криогенных осыпных склонов.....	327
9.8.3.1. Глыбовые осыпи	328
9.8.4. Защита инфраструктуры	330
9.9. СМЕШАННЫЕ ОСЫПИ	330
9.9.1. Каменные глетчеры.....	331
9.9.1.1. Состав отложений и строение активных каменных глетчеров	334
9.9.1.2. Происхождение льда в активных каменных глетчерах.....	335
9.9.1.3. Соотношение с растительностью.....	336
9.9.2. Движение активных каменных глетчеров	337
9.9.2.1. Горизонтальное перемещение	337
9.9.2.2. Движение фронта	338
9.9.3. Распространение активных каменных глетчеров	341
9.9.4. Неактивные и реликтовые каменные глетчеры	342
9.9.5. Потоки, протекающие под каменными глетчерами	343
9.10. КУРУМЫ.....	345
9.10.1. Характеристика курумов.....	346
9.10.2. Классификация курумов	349
9.10.2.1. Сибирские активные динамические курумы	350
9.10.2.2. Тибетские активные динамические курумы	352
9.10.2.3. Активные запаздывающие курумы	354
9.10.2.4. Неактивные и реликтовые курумы	355
9.11. ВНЕШНИЙ ВИД ПОВЕРХНОСТИ БЛОКОВЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И ИХ ЗНАЧЕНИЕ	359
ГЛАВА 10. КРИОГЕННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ГРУНТЫ	361
10.1. ВВЕДЕНИЕ	361
10.2. ФОРМЫ КРИОГЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ ГРУНТОВ	362
10.3. ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ КРИОГЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ ГРУНТОВ	363
10.4. МАКРОФОРМЫ КРИОГЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ ГРУНТОВ.....	367
10.4.1. Криогенные несортированные кольца	368
10.4.1.1. Криогенные грязевые фурункулы (пятна-медальоны).....	369
10.4.1.2. Арктические грязевые фурункулы (пятна-медальоны).....	369
10.4.1.3. Субарктические грязевые фурункулы (пятна-медальоны).....	373
10.4.1.4. Ксерические несортированные кольца	375
10.4.1.5. Несортированные кольца в морских климатических условиях.....	377
10.4.1.6. Морозные фурункулы (пятна-медальоны)	379
10.4.1.7. Круги-пробки	379
10.5. КРИОГЕННЫЕ СОРТИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ГРУНТЫ	381
10.5.1. Криогенные сортированные кольца	381

10.5.2. Криогенные сортированные полигоны и сети.....	384
10.5.2.1. Сортированные полосы.....	384
10.5.2.2. Каменные ямы.....	385
10.6. ИДЕНТИФИКАЦИЯ АКТИВНЫХ И НЕАКТИВНЫХ МАКРОФОРМ СОРТИРОВАННЫХ ГРУНТОВ	386
10.7. МИКРОФОРМЫ КРИОГЕННЫХ СТРУКТУРНЫХ ГРУНТОВ	387
ГЛАВА 11. ТЕРМОКАРСТ И ТЕРМОЭРОЗИЯ.....	389
11.1. ВВЕДЕНИЕ	389
11.2. ПРИЧИНЫ ТЕРМОКАРСТА.....	392
11.3. ОБРАЗОВАНИЕ ПОЛОСТЕЙ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ.....	395
11.4. ВЛИЯНИЕ ТЕРМОКАРСТА НА ОТЛОЖЕНИЯ	395
11.5. ТЕРМОКАРСТОВЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА.....	398
11.5.1. Термокарстовые ямы	398
11.5.2. Термокарстовые бугры.....	399
11.5.3. Шрамы пинго, пальс и литальс.....	401
11.5.4. Бисерные потоки (чётковидные русла).....	403
11.5.5. Термокарстовые озера.....	404
11.5.6. Ориентированные озера.....	407
11.5.7. Аласы.....	409
11.5.8. Цикл образования аласа.....	410
11.6. ТЕРМОКАРСТ И ТЕРМОЭРОЗИЯ ВДОЛЬ РЕК	416
11.6.1. Ледяные заторы	417
11.7. ТЕРМОАБРАЗИЯ И ТЕРМОКАРСТ ВДОЛЬ БЕРЕГОВ МОРЕЙ.....	421
11.7.1. Влияние сезонного морского льда.....	421
11.7.2. Влияние геологических условий	424
11.7.3. Влияние рельефа.....	425
11.7.4. Морские условия	426
11.7.5. Осадконакопление	426
11.8. ПРОЦЕССЫ, ВОВЛЕЧЕННЫЕ В ТЕРМОАБРАЗИЮ ЛЬДИСТЫХ АРКТИЧЕСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ	427
11.9. ЗНАЧЕНИЕ БЕРЕГОВОЙ ЭРОЗИИ И АБРАЗИИ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ОТЛОЖЕНИЙ.....	430
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	431

Предисловие

Эта книга предназначена для того, чтобы быть общим обзором молодой науки геокриологии, которая представляет собой исследование вечной мерзлоты, её характера, особенностей, процессов и распространения на Земле. Вечная мерзлота — результат особых климатических и геологических условий, в которых возникают мёрзлые горные породы и подземный лёд. Она оказывает огромное влияние на деятельность человека в холодных районах и окружающую среду в Арктике. Эти регионы отличаются от более тёплых областей присутствием сезонных или многолетних мёрзлых пород. Движение воды при промерзании вызывает вертикальные движения поверхности земли, в то время как сокращение массивов горных пород в холодную погоду может вызывать их растрескивание. Уникальная группа ландшафтных явлений и процессов встречается в этих областях, которых нет в других местах.

Вечная мерзлота есть на всех континентах кроме, возможно, Австралии. Её распространение тесно связано с климатом и окружающей средой, так что любые изменения в последних приведут к расширению области вечной мерзлоты или её сокращению, или к потере подземного льда. Как только в результате оттаивания вода появляется на поверхности, дальнейшее плавление подземного льда трудно остановить, что приводит к развитию процесса, названного термокарстом. Гидрология областей вечной мерзлоты более сложна, чем в других районах, и сама вода — источник тепла, которое может разрушить подземный лёд. Области с засоленными отложениями распространены в засушливых условиях, а также в тех регионах, которые находились под морем. Соли изменяют свойства горных пород, уменьшая температуру из замерзания и несущую способность.

Эти холодные условия приводят к разрушению материалов, таких как бетон и кирпич, а также тепловому сжатию, что под угрозу оборудование и инженерные сооружения. Рост льда вызывает пучение грунтов, в то время как оттаивание подземного льда приводит к переувлажнению почвы и тепловым осадкам. Прибрежные районы подвергаются особому и опасному виду абразии — термоабразии, в то время как весеннее оттаивание вызывает насыщение водой горных пород и почв и деструктивные склоновые процессы. Допустимая нагрузка от инженерных сооружений меняется в зависимости от сезона и часто значительно ниже, чем в других районах. Поступающее солнечное излучение меняется в зависимости от наклона поверхности и вызывает неравномерное оттаивание. Таким образом, в этих регионах возникают многочисленные проблемы для людей, некоторые из которых уникальны.

Человечество извлекает все больше ресурсов из этих регионов, и это требует хорошего знания геокриологии, чтобы успешно реализовать экономические проекты. Необходимы предварительные исследования для оценки возможностей и рисков освоения этих районов. Если найдено новое месторождение полезных ископаемых, важны надёжные дороги, необходим доступ к зданиям, оборудованию, здания для рабочих и предметы снабжения, а также объекты для удаления

отходов. Должны быть найдены источники энергии и воды и при необходимости построены соответствующие сооружения. Люди должны иметь достойную жизнь, чтобы выполнять необходимую работу.

Коренные народы, хотя и издавна проживают в этих отдалённых районах, не меньше нуждаются в современных удобствах и инфраструктуре. Там, где это возможно, они должны получить работу в обмен на нарушение их окружающей среды. Необходимо обеспечить максимально возможную защиту природной среды и дикой природы. Северные ландшафты очень хрупки, и крайне важно избегать ущерба, особенно такого, который делает невозможным образ жизни коренных народов. Загрязнение окружающей среды должно быть сведено к минимуму. По окончании срока действия того или иного проекта должны были быть выделены соответствующие средства на очистку и рекультивацию. К сожалению, часто это не делается.

Обширные области вечной мерзлоты являются пастбищами в высоких широтах, а также на возвышенностях, таких как плато Цинхай-Тибет. Тайга представляет собой один из самых крупных на планете лесных ресурсов. Нарушение растительности может привести к изменению температурного режима грунта, так что землепользование может быть проблематичным.

Эта книга написана тремя специалистами, представляющими три страны с обширными областями вечной мерзлоты и тремя различными языковыми группами. Втроём имеют более 120-летний опыт исследований и участия в проектах на вечной мерзлоте во всем мире, и они попытались обобщить здесь свои знания. Подобные проблемы встречаются в любой области вечной мерзлоты на планете, и сравнение знаний, полученных в разных частях мира, обнаруживает большое сходство. Однако климатические и другие факторы приводят к значительным местным изменениям, так что ни один континент или страна не обладают ни всем спектром возможных условий, ни исключительным опытом или знаниями. По этой причине глобальный взгляд представляется оправданным.

Эта книга состоит из трёх частей. Первая включает введение и общие характеристики вечной мерзлоты. Она состоит из четырёх глав, где рассматриваются определения и уникальные процессы, действующих в холодных районах, факторы, влияющие на них, и объяснение распространения вечной мерзлоты. Вторая часть состоит из семи глав, описывающих характерные для вечной мерзлоты ландшафтные формы. Наконец, в третьей части рассматриваются проблемы, с которыми сталкиваются инженеры при строительстве в районах вечной мерзлоты, а также лесоводы и земледельцы. Имеется значительная библиография, а также около 350 иллюстраций, чтобы сделать книгу более удобной для читателя.

Предисловие к русскому изданию от редактора

Настоящая работа стала результатом усилий нескольких лет. При её написании, изначально на английском языке, авторы решили, что предпримут попытки её издания в России и Китае, учитывая вклад этих стран, развития территорий с вечной мерзлотой и необходимость международного обмена современными знаниями. Эта книга может быть использована как учебник по курсу геокриологии в геологических и инженерных вузах, а также для самоподготовки, как современная монография, и как справочник для специалистов. Освоение Арктики продолжается, и надеюсь, что эта работа будет полезной.

В книге сделана попытка собрать воедино как обширный российский опыт — а именно Россия стала страной, где появилась геокриология (мерзловедение), и где она успешно развивалась несколькими поколениями учёных и специалистов, — так и показать русскоязычному читателю современный уровень этой науки на Западе и в Китае. По моему мнению, русское издание расширяет английский вариант, потому что в него включены некоторые небольшие дополнительные материалы от редактора, выделенные более мелким (9) шрифтом, которые мне показалось важным включить, учитывая сложившуюся практику в России и богатый опыт отечественных исследований. Приведены также некоторые важные разъяснения.

Необходимо иметь в виду, что всякий перевод не вполне совершенен, и не всегда, учитывая разработанность предмета, можно полностью передать значение, вкладываемое авторами на английском языке. Перевод сделан по возможности ближе к тексту, что иногда, к сожалению, не делает его лёгким для понимания. По возможности, в русском издании добавлены уточнения.

Понятия и термины, возникшие в геокриологии почти за сто лет её развития, выделены курсивом в тексте. Также приводятся их английские аналоги, что, по видимому, будет полезно читателю при его продолжении знакомства с англоязычными источниками. Рисунки оставлены с английскими надписями, но в пояснении дан их перевод. Там, где англоязычные термины отсутствуют, они опускаются, или же говорится, что термин используется в России. Например, текст «**морозное измельчение (*frost comminution*)**, род физического выветривания, называемое в России **криогенным выветриванием...**» означает, что термин «**морозное измельчение**» предлагается использовать в России, а его аналог — «***frost comminution***» используется за рубежом, при этом «**криогенное выветривание**», если не приводится его англоязычного аналога — только в России. Необходимо отметить, что целый ряд терминов, например «**касты**» и другие, для которых в России не нашлось подходящих аналогов или редактор счёл их не полностью отражающими смысл англоязычного термина, вводятся на русском языке впервые.

В российской и советской науке существует давняя, и, на мой взгляд, полезная традиция превращать зарубежные понятия, происходящие порой из словаря обычной речи, в отечественные научные термины. Тем самым не только

обогащается язык (перевод не всегда является точным), но и облегчается понимание друг друга во всем мире. Тем более, что английский язык за последние десятилетия стал языком международного научного общения. В этом смысле важно, что в геокриологии ряд международных (англоязычных) терминов пришёл, например, из якутского языка, где вечная мерзлота является частью жизни народа и где соответствующим объектам дана наиболее точная их характеристика. Много, как известно, в международной терминологии по геокриологии и изначально русских слов, чего, можно с гордостью отметить, нет, вероятно, ни в какой другой науке, и что подчёркивает её важность для России, где вечная мерзлота занимает около 65 % территории. Однако, учитывая новизну определенной части материала на русском языке, редактор этого издания будет признателен за замечания и советы, которые читатель может прислать на кафедру геокриологии МГУ им. М. В. Ломоносова.

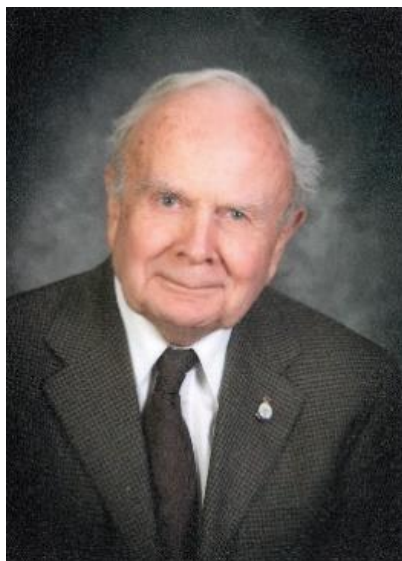
Значительная работа по переводу была выполнена магистранткой кафедры геокриологии В. А. Сантаевой, но текст был частично переведён, а также переработан и дополнен редактором русского издания. Большую помощь оказали студенты и аспиранты кафедры Э. А. Карнышева, А. А. Кудаев, А. В. Луговская, А. В. Окунев, А. А. Фалалеева, У. Б. Фаттоев, Ю. В. Черняк, Я. Ю. Шелков, которым выражаю свою признательность. Прочитали и внесли свои замечания Е. Н. Оспенников (Глава 7) и А. И. Тюрин (Глава 9), которым хочу выразить благодарность. Я глубоко благодарен также своим российским коллегам, список которых приведён в предисловии к английскому изданию, за разрешения использовать их иллюстрации, и надеюсь, что работа будет встречена с благосклонностью, а отзывы на неё послужат делу её улучшения.

На научные взгляды редактора и соавтора этой книги оказали влияние его учителя профессора В. А. Кудрявцев, Б. Н. Достовалов, Э. Д. Ершов, Б. А. Савельев, Н. Н. Романовский, С. С. Вялов, В. Т. Трофимов в другие, а позднее профессора И. Д. Данилов, К. Ф. Войтковский, Ю. К. Васильчук, С. Е. Гречищев, В. О. Орлов, М. А. Минкин, Я. В. Неизвестнов, А. А. Колесов, а также профессора П. Вильямс (P. Williams) и Н. Френч (N. French), коллеги по кафедре мерзлотоведения (геокриологии) профессора Л. Н. Хрусталев и И. А. Комаров, В. Г. Чеверев, Л. Н. Максимова и другие, коллеги и друзья по Амдерминской мерзлотной станции В. И. Аксенов, Ю. С. Петрухин, А. Л. Данилов, Г. В. Лепинских, Н. Ф. Цыбина, А. Н. Хименков, Л. В. Чистотинов, коллеги по ПНИИИСу профессор В. В. Баулин, Ю. Т. Уваркин, Г. И. Дубиков, М. М. Корейша, Ю. Д. Зыков, Н. П. Левантовская и экспедициям в Арктику и Сибирь Ю. Б. Шешин, В. А. Дубровин, Г. И. Грива, чл.-корр. РАН В. Ф. Гальченко и другие, коллеги по работе в Институте геоэкологии РАН акад. В. И. Осипов, В. П. Мерзляков, А. Н. Власов, коллеги по Университету Хоккайдо профессора М. Фукуда (M. Fukuda) и Ф. Томита (F. Tomita) и Институту криосферы Земли СО РАН акад. В. П. Мельников, В. В. Самсонова и многие другие, которым выражаю искреннюю и глубокую благодарность.

Я глубоко признателен также рецензентам этого издания академику РАН В. П. Мельникову и профессору В. Т. Трофимову.

После выхода в свет английского издания этой книги в издательстве Taylor&Francis CRC Press в 2018 году она попала в шорт-лист престижной премии 2019 PROSE Awards Ассоциации Американских Издателей, которая присуждается лучшим профессиональным публикациям года.

Об авторах



Стюарт Артур Харрис (Stuart Arthur Harris)

родился 14 января 1931 года в Челтенхеме, Глостершир, Англия. Он получил степени бакалавра наук, доктора наук в области геологии и доктора наук в области географии в Университете королевы Марии и Лондонском университете. Во время своей военной службы он консультировал Главное инженерное управление, Британские войска Египта и инженеров Арабского легиона в Иордании, решая проблемы геологии и водоснабжения этих районов. Впоследствии он был инспектором почв в консалтинговой компании «Hunting Technical Services», прежде чем стать правительственным инспектором почв в Гайане. Преподавал на кафедре географии Чикагского университета Вильфреда Лурье и Университета Канзаса прежде, чем стал работать в Университете Калгари, Канада в 1969 году. Национальный исследовательский

совет Канады попросил, чтобы он изучил взаимодействие климата и вечной мерзлоты в 1973, и он впервые нанёс на карту распространение вечной мерзлоты от Северного Нью-Мексико в США до Инувика, Северо-Западные территории Канады. Впоследствии он провёл исследования вечной мерзлоты и связанных с ней процессов на северо-западе Канады, а также на Тибетском плато, Китай. Вёл полевые работы в Исландии, Альпах, Польше, России, Китае, Монголии, Новой Зеландии и Казахстане, опубликовав свыше 200 статей, книг и докладов. Русское географическое общество наградило его медалью Николая Михайловича Пржевальского за его исследования горной вечной мерзлоты в 1996 году. Он также организовал три международных полевых экспедиции в Скалистых горах для зарубежных учёных в связи с международными конференциями в Канаде.



Анатолий Викторович Брушков родился 18 апреля 1957 года и вырос в посёлке Хатанга, бывшем административном центре Таймырского (Долгано-Ненецкого) автономного округа Красноярского края, обучаясь в школе-интернате

вместе с детьми коренных северных народов. Закончив школу с золотой медалью, поступил на геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, где стал учеником выдающихся российских исследователей вечной мерзлоты, таких как В. А. Кудрявцев, С. С. Вялов, Э. Д. Ершов и И. Д. Данилов, а впоследствии получил там же степень доктора наук. На протяжении ряда лет он руководил научно-исследовательской мерзлотной подземной станцией в Амдерме (АНИМС), Ненецкий автономный округ, которая проводила важные исследования механических свойств мёрзлых грунтов и участвовала в инженерных проектах по всей Российской Арктике. Затем работал в качестве начальника отдела инженерного мерзлотоведения в Производственном и научно-исследовательском институте по инженерным изысканиям (ПНИИС) Госстроя СССР, заведующим геокриологической лабораторией в Институте геоэкологии РАН им. Е. М. Сергеева, и специализировался на изучении влияния солей на свойства мёрзлых пород и влиянии изменения климата на вечную мерзлоту. Он также провёл исследования по выживанию микроорганизмов в вечной мерзлоте, был консультантом ряда других российских и международных компаний и учреждений. Работал в области исследования газов в вечной мерзлоте и термокарста, участвовал в полевых работах на Европейском Севере России, на Арктическом побережье, в Западной Сибири, Якутии, Канаде и на Аляске. В течение нескольких лет работал в Японии, был профессором Университета Хоккайдо, а затем Тюменского государственного нефтегазового университета, опубликовав около 200 различных работ. С 2010 года — профессор, заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ.



Годун Чэн (Guodong Cheng), академик Китайской АН, родился 11 июля 1943 года в Шанхае, Китай. Он получил степень бакалавра в Пекинском геологическом колледже (Китайский университет геологии) и провёл фундаментальные исследования в лабораториях КРЕЛ (CREEL) Армии США в Ганновере, Нью-Гэмпшир, прежде чем вернулся в Китай. В 1993 году Ченг Гуодонг стал академиком Китайской академии наук. Он отвечал за реорганизацию Института гляциологии и геокриологии Китайской академии наук, образовав Эколого-инженерный научно-исследовательский институт холодных и аридного регионов. Он успешно руководил исследованиями, тем самым позволив модернизировать технику строительства в районах вечной мерзлоты Китая в течение последних 15 лет. Одним из важнейших его достижений стала

разработка эффективных методов охлаждения оснований линейных транспортных путей с использованием каменных блоков. Он написал восемь книг, и его имя в списке авторов многочисленных документов, касающихся использования вечной мерзлоты. Он получил ряд важных наград в Китае, а также является лауреатом одной из первых трех наград IPA Lifetime Affairs Международной ассоциации по вечной мерзлоте (IPA).

Благодарности

Ряд живых и, к большому сожалению, умерших коллег и организаций любезно разрешили использовать свои фотографии в этой книге. Глубокая благодарность Василию Богоявленскому (Vasily Bogoyaavlensky) (Рис. 7.9), В. Burton (Рис. 10.3), Mike Chambers (Рис. 10.2), Lee and Barbara Clayton (Рис. 6.6), Hanna H. Christiansen (Рис. 7.16), Р. В. Десяткину и А. Р. Десяткину (R. V. Desyatkin and A. V. Desyatkin) (Рис. 11.17), R. O. van Everdingen (Рис. 11.8), Сергеем Фомину (S. Fomin) (Рис. 5.20), D. Froese (Рис. 5.22), Алдару Горбунову (Aldar Gorbunov) (Рис. 9.13), Михаилу Григорьеву (M. Grigoriev) (Рис. 1.31, 6.4 & 6.8А), Геннадия Гриве (Gennady Griva) (Рис. 15.6 & 15.9), Анатолию Губарькову (A. Gubarkov) (Рис. 5.3, 8.5 & 11.2), Bernard Hallet (Рис. 10.1), Owen L. Hughes (Рис. 11.6), В. М. Jones (Рис. 11.37), Валентину Кондратьеву (V. Kondratiev) (Рис. 13.35, 14.18 & 14.19), А. Г. Костяеву (A. G. Kostyaev), (Рис. 6.8В), Ю. Н. Мудрову (Рис. 7.15), I. W. Lee (Рис. 14.25), A. G. Lewkowicz (Рис. 7.43), J. Ross Маскау (Рис. 7.3 & 11.13), Владимиру Мельникову (V. Melnikov) (Рис. 13.7), Алексею Осокину (A. Osokin) (Рис. 14.1, 14.12 & 14.22), E. Pike (5.16), L. and S. Rollinson (2.8), M. Rosen (Рис. 13.37), Вере Самсоновой (Vera Samsonova) (Рис. 5.31, 6.2 & 13.25), M. K. Seguin (Рис. 7.21), W. W. Shilts (Рис. 11.10), C. Scapozza (Рис. 9.11), V. Singhroy (Рис. 8.33), Tourismusverband Werfen (Рис. 6.12 & 6.13), A. Cheng (Рис. 11.8), J.-S. St. Vincent (Рис. 11.35), G.-S. Wang (Рис. 17.9), Sizhong Wang (Рис. 5.9), Yakutic Reindeer Tours (Рис. 18.4), Y.-H. You (Рис. 17.5), Андрею Чжану (Рис. 11.1), Александру Тюрину (A. Tyurin) (Рис. 9.27, 9.30, 9.38, 9.39) и Михаилу Железняка (M. Zheleznyak) (Рис. 4.12). Остальные фотографии были сделаны тем или иным автором этой книги.

Несколько журналов разрешили использование иллюстраций, ранее опубликованных в их изданиях, включая Arctic (Рис. 1.8, 1.10, 3.17, 3.5, 3.6, 4.2), Arctic, Antarctic и Alpine Research, ранее Arctic и Alpine Research, Университет Колорадо (Рис. 7.22, 8.6, 8.7А, 10.10 и Табл. 1.1). Кроме того, Elsevier (Табл. 3.1), Matti Seppälä (Рис. 7.18) and Владимир Романовский (V. Romanovsky) (Рис. 2.7) разрешили использовать ранее опубликованные материалы. Рис. 1.9, 1.13, 1.14, 2.23, 4.17, 13.8, 16.5, 18.12, 18.13 воспроизводятся из книги, написанной Стюартом Харрисом (Stuart A. Harris) и опубликованной в 1986 г. В большинстве случаев рисунки были перерисованы Робинот Пойтрасом (Robin Poitras), кафедра географии Университета Калгари, чтобы привести рисунки к последовательному стилю во всей книге. Памела Харрис любезно прочитала рукопись вместе с Анатолием Брушковым и Стюартом Харрисом.

Посвящение

Эта книга посвящена нашим жёнам, **Памеле Розмари Харрис (Patela Rosemary Harris)**, **Марине Ивановне Брушковой** и **Чжан Юфэнь (Zhang Youfen)**, в знак признательности за их бесконечное терпение, поддержку, понимание и дружеское отношение на протяжении последних нескольких десятилетий, пока мы проводили исследования в области геокриологии. Без них эта книга была бы невозможна.

Часть I

ВВЕДЕНИЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Геокриология — это наука, изучающая процессы и явления, возникающие при температурах горных пород ниже 0 °С в поверхностных горизонтах земной коры. В областях с тропическим или субтропическим климатом не происходит промерзания на протяжении всего года. В этих регионах действуют обычные геоморфологические процессы, исключая оледенения и процессы, уникальные для областей с многолетнемерзлыми или сезонномерзлыми породами.

Определение термина «**отложения (soils)**», часто используемое в этой книге, относится к верхним слоям горных пород, в том числе и скальным, которые были преобразованы в результате выветривания и почвообразования, или невыветрелым осадочным породам, если не указано иное.

Термин «**грунт**» здесь также используется, но мы старались по возможности его избегать, полагая, что **грунты** — это горные породы и почвы, рассматриваемые как объект инженерной деятельности человека, в трактовке коллег, работающих в области инженерной геологии. Он также рассматривается применительно к **структурным грунтам (patterned grounds)** (см. гл. 10). Собственно **почвы (soils)**, безусловно, также рассматриваются, но применительно к **криогенным процессам при температурах ниже 0 °С (cryogenic processes where temperature dip below 0 °С)**.

По мере продвижения к полюсам климат становится достаточно холодным для того, чтобы поверхностные горизонты земной коры подвергались воздействию температур ниже 0 °С. Это охлаждение может быть временным или кратковременным, продолжающимся в течение одного или более часов, или в течение нескольких дней в году. Горные породы относятся к сезонномерзлым, имеющим отрицательную температуру в течение нескольких месяцев, и продолжительность периода без промерзания становится лимитирующим фактором для биоты. Еще далее к полюсам появляются грунты, температура которых остается ниже нуля в течение более чем двух лет. Эти холодные горизонты литосферы называют вечной мерзлотой, а горные породы называют **вечномерзлыми**, или **многолетнемерзлыми**.

Несмотря на то, что специалисты называют горные породы, находящиеся в мерзлом состоянии более двух лет, многолетнемерзлыми, а толщи таких пород — многолетнемерзлыми толщами, их можно также называть **вечномерзлыми породами (permafrost soils или grounds)**, или **вечной мерзлотой (permafrost)**. Это вполне удачное название, широко использовавшееся

в прошлом, и в разговорном языке. В русском языке слово «вечный» имеет несколько значений, в том числе длительный, длящийся веками, а не только существующий всегда. В словаре В. Даля «вечный, что без начала и без конца, безначальный и бесконечный; всегдашний постоянный, нескончаемый, неизменный; бессрочный, весьма длительный, продолжительный, пожизненный», поэтому «вечная мерзлота» — точное название, как считал еще М. И. Сумгин (1937).



Рис. 1.1. Типичный разрез с льдистыми породами ниже слоя сезонного оттаивания (активного слоя) 72 см (Мохэлла, Исландия). Обратите внимание на концентрацию льда в поверхностных слоях, при этом льдистость уменьшается с глубиной. © S. A. Harris

Мощность многолетнемерзлых пород увеличивается с понижением среднегодовой температуры, при прочих равных условиях, тогда как слой сезонного оттаивания, или активный слой, как его называют за рубежом, уменьшается. **Временно-** или **сезонномерзлые породы** обычно промерзают зимой с поверхности, но оттаивают летом, и часто неточно описываются как **активный слой (active layer)**, хотя они имеют другую льдистость и распределение льда. В России этот горизонт называется слоем сезонного промерзания. Вечномерзлыми грунтами (горными породами) называют грунты (горные породы) под активным слоем (слоем сезонного оттаивания) с температурой ниже 0 °С в течение более двух лет. Обратите внимание, что термин применяется независимо от влажности.

Ключевым свойством в области вечной мерзлоты является тенденция накапливать воду — H₂O в форме льда в своих верхних горизонтах, что выражается

Поверхностные горизонты вечномерзлых пород находятся в равновесии с современным климатом, но более глубокие горизонты могли быть сформированы в прошлых, более холодных климатических условиях и называются **реликтовой вечной мерзлотой (relict permafrost)**. Открытие реликтовой мерзлоты, сделанное впервые на территории Западной Сибири, принадлежит профессору Томского госуниверситета А. А. Земцову (1957 г.). **Ледники (glaciers)** не включены в рассмотрение, являясь формами рельефа с их характерными процессами и явлениями, изучаемые **гляциологией (glaciology)**. При этом у нее много общих вопросов с **геокриологией (geocryology)**, например, состояние ложа ледника или процессы вблизи его границы.

В России грунты, или горные породы, подвергающиеся временному, сезонному и длительному промерзанию, рассматриваются как составляющие **криолитозоны (cryolithozone)**, однако эта терминология обычно не используется исследователями за рубежом. Глубина промерзания зависит от ландшафта и тепловой истории, и изменяется от нескольких сантиметров до сотен метров.

в уникальном распределении влаги в грунте (рис. 1.1). Количество накопленной влаги может достигать до 90 % объема ниже кровли многолетнемерзлого грунта. Это приводит к серьезным изменениям во влажностном режиме этих грунтов, наряду с важной зависимостью от стабильности климата. Без этого грунтовый лед может частично или полностью оттаять в течение теплых периодов. Погода и климат постоянно меняются, в то время как другие части окружающей среды, такие как подземные воды и растительность, также подвергаются изменениям со временем.

Подземные воды, лед и отрицательные температуры в совокупности приводят к образованию особых форм рельефа, характерных для этих областей, в то время как сезонное промерзание может способствовать возникновению процессов, не встречаемых в более теплом климате. В 1 части этой книги в главе 1 представлены основные характеристики вечной мерзлоты, а в главе 2 обсуждаются процессы, встречающиеся только в криолитозоне. В главе 3 рассматриваются факторы, воздействующие на образование мерзлых пород, а в главе 5 описано современное состояние вопроса об их распространении. В 2 части описаны уникальные формы рельефа, а в 3 части обсуждаются ограничения и проблемы, влияющие на развитие в этих областях.

Глава 1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОПИСАНИЕ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Вечная мерзлота (permafrost) определяется как горные породы, или грунты с температурой, которая остается ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ более двух лет (ACGR, 1988). Она включает сухие породы и почву, а также все ледяные субстраты, включая ледниковые отложения, но исключая настоящие ледники. Ледники рассматриваются в науке как отдельный предмет, хоть и существуют смежные вопросы (Dobin'ski, 2012). Соленые водоемы и подземные воды при отрицательной температуре могут оставаться незамерзающими как часть **вечной мерзлоты**. Горные породы, температура которых ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, называются также **криотическими (cryotic)**. Изучение вечной мерзлоты называется **геокриологией** и является частью криологии, которая изучает все мерзлую материю, или вещество ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

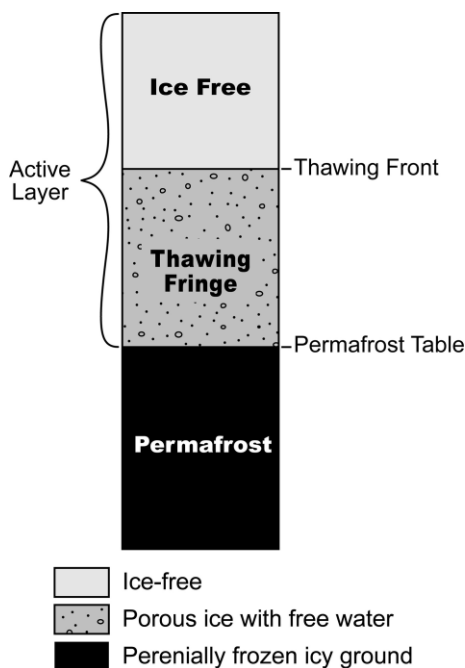


Рис. 1.2. Названия частей верхних слоев в разрезе вечной мерзлоты в торфе, который находится в равновесии с современным климатом, — активный слой (active layer), фронт протаивания (thawing front), малольдистая (ice free) зона, подстилающаяся вечной мерзлотой (permafrost), кровля мерзлоты (permafrost table), оттаивающая бахрома (thawing fringe). (Harris, 2005)

Сухая вечная мерзлота (dry permafrost) (ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) в настоящее время встречается в Антарктиде. При отсутствии влаги грунты обладают другими термическими свойствами по сравнению с влажными, т. к. необходимы затраты энергии для нагрева воды (льда), и, наоборот, вода содержит больше тепловой энергии, чем воздух, поэтому больше тратится энергии на изменение температуры в $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ влажного грунта. В других областях, холодные массивные горные породы обычно не рассматриваются как сухая вечная мерзлота, т. к. лед находят в трещинах. Это имеет важное значение, т. к. теплая летняя дождевая вода может частично оттаять лед, позволяя воде проникать в внутримерзлотные талики или подземные воды под вечной мерзлотой.

Характер грунта влияет на тип геологического разреза и его тепловой режим, но типичный разрез в дисперсных отложениях показан на рисунках 1.1 и 1.2. Вблизи поверхности находится слой, который промерзает и оттаивает в течение года, и поэтому называется **активным слоем, или слоем сезонного оттаивания (active layer)**. Термин «активный слой» в этом смысле используется англоязычными авторами и рекомендован IPA, а в России он встречается со времени О. К. Ланге (1961).

Термин «деятельный слой», являющийся точным переводом с английского active layer, используется у нас также в ином смысле (Чудновский, 1948), и, вероятно, менее предпочтителен. В отложениях с небольшой пористостью он проявляется в виде зоны, свободной ото льда, или

малольдистой (ice free) зоны, подстилающейся вечной мерзлотой (permafrost), а граница между ними называется **кровлей мерзлоты (permafrost table)**. В более пористых отложениях, таких как торф, активный слой включает льдистую зону, в которой верхний горизонт водопроницаем и позволяет грунтовой воде проходить через нее (рис. 1.3). По мере того, как вода движется, она расширяет поры, расплавляя внешний слой окружающего минеральные зерна льда, и этот слой называется **оттаивающей каймой (thawing fringe)**. Лед в этом слое частично тает, следовательно, этот слой является частью активного слоя. На его верхней поверхности находится оттаивающий фронт. Часто он встречается, если торф составляет в разрезе более 50 % активного слоя.

В пористых минеральных грунтах он меньше и отсутствует в глинах и в коренных породах. Поскольку фактическое положение кровли вечной мерзлоты меняется из года в год, зона изменения называется **переходным слоем (transient layer)**, и на северо-западе Северной Америки она характеризуется накоплением льда. Как правило, мощность этого слоя небольшая, за исключением горных районов с изменчивым континентальным климатом. В Западной Сибири маломощный сухой переходный слой был описан в плотных отложениях (Shur, 1988a; 1988b). Этот сухой слой называется **защитным слоем (shield layer)**, который действительно защищает льдистую вечную мерзлоту от протаивания при колебаниях климата. Обратите внимание, что **сезонно-мерзлый слой (seasonally frozen layer)**, или **слой сезонного промерзания**, и **сезонно-талый слой (seasonally thawed layer)**, или **слой сезонного протаивания**, не идентичны. В любой отдельный год глубина сезонного оттаивания в районах с вечной мерзлотой не зависит от глубины сезонного промерзания в областях, где мерзлота отсутствует. Текстура и содержание льда в этих слоях различны, поэтому использование этих терминов в России уникально и оправдано. Обычно наблюдается максимальная концентрация льда в отложениях, непосредственно ниже кровли вечной мерзлоты, при этом содержание льда, как правило, уменьшается с глубиной (рис. 1.1). Нижняя граница вечной мерзлоты называется **подошвой вечной мерзлоты (permafrost base)**.



Рис. 1.3. Пористый лед на поверхности в аллювиальных отложениях, Klwane, Yukon Territory, Canada. © S. A. Harris

Толща вечной мерзлоты может включать области, называемые **таликами (talik)**, где мерзлые породы отсутствуют. **Сквозные талики (through taliks)** могут встречаться под реками и крупными озерами, но под меньшими водоемами талики мелкие и подстилаются вечной мерзлотой. Последние называются **несквозными таликами (supra-permafrost taliks)**, или **ложными таликами (blind или false taliks)** в русской литературе (рис. 1.4). Эти надмерзлотные талики образуются благодаря тому, что

вода является источником тепла и должна терять большие количества энергии ($3,33 \cdot 10^5$ Дж/кг) при изменении ее фазового состояния от жидкости до льда при

0 °С, Обычное распределение таликов и их терминология показаны на рис. 1.4. Иногда **закрытые талики (closed talik)**, или **внутримерзлотные** талики или подмерзлотные горизонты насыщены соленой водой, которая не может замерзнуть из-за засоленности. Она представляет собой рассол, образующийся после того, как окружающая вода замерзла, концентрируя соли в оставшемся растворе, — такие подземные воды называются **криопэгами (cryopegs)**.

Криопэги типичны как подземные воды около морских берегов. Из-за высоких концентраций солей они могут оставаться жидкими при очень низких температурах. Это может привести к тому, что соленая вода будет перемещаться в толщу вечной мерзлоты. Искусственные криопэги могут также возникать в результате использования соленой воды при бурении скважин.

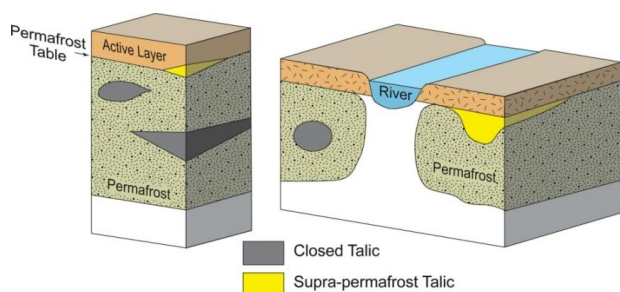


Рис. 1.4. Блок-диаграмма области с вечной мерзлотой (permafrost), включающая реку (river) с указанием названий составляющих частей — кровли мерзлоты (permafrost table) и несквозных таликов (supra-permafrost talik). Закрытые (closed talik) талики могут образовывать каналы, параллельные поверхности земли, через которые грунтовые воды движутся вниз по склону

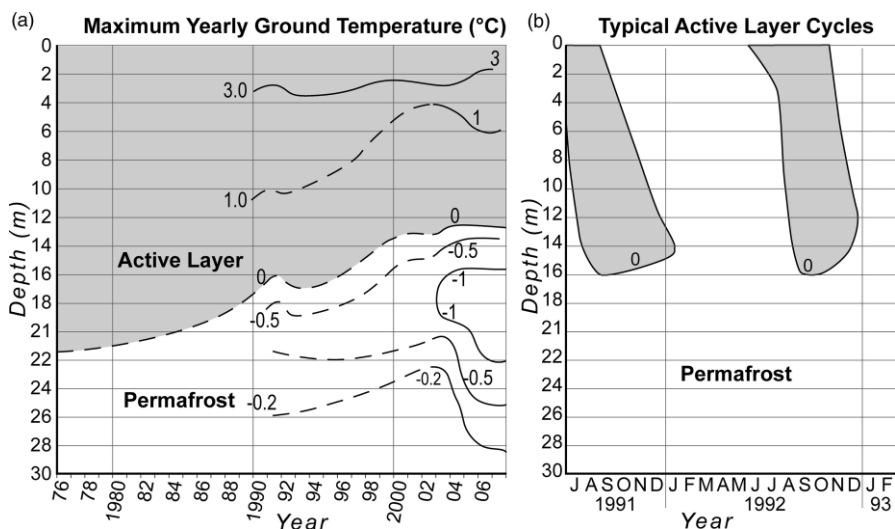


Рис. 1.5. Изменение мощности (depth, m) активного слоя (active layer) при максимальной годовой температуре горных пород (maximum yearly ground temperature), °С (a), в течение 30 лет на скважине Plateau Mountain # 2, пробуренной в массивных известняках и доломитах в юго-западной Альберте, Канада в области развития вечной мерзлоты (permafrost) и (b), типичные циклы активного слоя (typical active layer cycles) — форма теплой летней волны в течение двухлетнего периода с 1991 по 1993 год по месяцам от января (J) до декабря (D) (из Harris, 2008, Рис. 4). В соседних обломочных отложениях мощность активного слоя более 1,5–2,5 м.

В Северной Америке немерзлый горизонт ниже подошвы вечной мерзлоты иногда называют **подмерзлотным таликом (sub-permafrost talik)**.

Он развивается там, где наблюдается существенное потепление климата (см. Главу 3), так что активный слой может полностью не промерзнуть, а **реликтовая вечная мерзлота** отделена от верхних слоев вечной мерзлоты. Это происходит там, где вечная мерзлота начинает деградировать (Jin *et al.*, 2006). Большинство грунтов состоят из обломочных отложений с точечными контактами и промежутками между ними. Эти пространства могут быть частично или полностью заполнены льдом в мерзлых горизонтах. Когда этот лед тает, может наблюдаться значительная осадка поверхности, называемая **осадкой (subsidence) при оттаивании**, в то время как полученная вода может привести к фактическому сжижению осадка. Тепловые свойства, включая теплопроводность, зависят от характера контактов между зернами, пористости и содержания воды / льда.

В разрезах коренных пород вечная мерзлота довольно разная, хотя ее редко рассматривали. На горе Плато на юго-западе Альберты, Канада, коренные породы состоят из массивного известняка и доломита, некоторые части покрыты тонким слоем дисперсных отложений, с поверхностями, состоящими из тонкослоистого известняка с морозобойным трещинами, в то время как другие состоят из массивного известняка (Harris & Brown, 1978). В областях с дисперсными отложениями мощность активного слоя характерна для разрезов в других осадочных породах, то есть около 1,5–2,5 м. В сланцеватой, трещиноватой горной породе активный слой оказался около 5–8 м, а в массивной скальной горной породе мощность активного слоя составляла 13–21 м (рис. 1.5). Подобные по мощности активные слои в коренных породах были отмечены в Норвегии (Christiansen *et al.*, 2010; Farbrot *et al.*, 2011). Это связано с высокой теплопроводностью коренных пород, которая изменяется от 4,92 до 6,1 Вт/мК для керна из скважин на горе Плато (Harris & Brown, 1978). Поскольку в массивной породе имеется незначительное пористое пространство, тепловой поток очень велик по сравнению с горными породами или осадками, содержащими воздух в порах и трещинах. В этом случае сезонное нагревание и охлаждение распространяются на гораздо большую глубину. Воздух — плохой проводник тепла, а лед — довольно эффективный проводник, хотя он имеет несколько более низкую теплопроводность, чем коренные породы. Скважины наблюдались в течение многих лет, и последующее понижение среднегодовой температуры воздуха привело к тому, что самый глубокий активный слой уменьшился на несколько метров, хотя в большинстве случаев он еще глубже 13 м (рис. 1.5а).

Трещины в коренных породах затрудняют измерение мощности активного слоя в массивных коренных породах, а также обеспечивают аномалии температуры при определении фактической глубины залегания кровли вечной мерзлоты. Когда лед тает весной, образовавшаяся вода движется по трещинам, нагревая горные породы. Так же вода теплых летних дождей попадает в трещины, нагревая стенки, хотя бы на короткий промежуток времени. Мониторинг скважин в вечной мерзлоте, прилегающей к разрывным нарушениям, показал, что происходят внезапные повышения температуры горных пород выше 0 °С в течение нескольких часов или даже одного или двух дней. Эти колебания обычно не рассматриваются при картировании вечной мерзлоты, поскольку они влияют только на небольшие области вокруг крупных разрывов. Однако вечная мерзлота в этих породах оказывается проницаемой, и вода может перемещаться вниз в районах с относительно теплой вечной мерзлотой. Это не происходит в районах более холодной, сплошной вечной мерзлоты, например, в Национальном парке Наханны.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru