

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	31
----------------	----

ЧАСТЬ I ТЕРМОДИНАМИКА МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Глава I. МЕТОДЫ КЛАССИЧЕСКОЙ (РАВНОВЕСНОЙ) ТЕРМОДИНАМИКИ В ГЕОКРИОЛОГИИ.	35
--	----

I.1. Основные законы и аксиоматика равновесной термодинамики.....	36
I.1.1. Основные законы термодинамики. Уравнения состояния.....	36
I.1.2. Гомогенные и гетерогенные равновесия. Фазы и компоненты термодинамических систем	39
I.1.3. Аксиоматика термодинамики.....	41
I.2. Аппарат термодинамики.....	44
I.2.1. Метод обобщенных переменных. Потенциалы и координаты состояния. Характеристические функции.....	44
I.2.2. Соотношения Максвелла. Преобразования Лежандра.	48
I.2.3. Дифференциальные уравнения термодинамики. Сопряжения p потенциалам и координатам состояния. Смешенные сопряжения.	50
I.3. Термодинамический метод в геокриологии.....	54
I.3.1. Мерзлые породы как термодинамические системы.....	54
I.3.2. Саморегуляция и саморазвитие мерзлых пород. Принцип Ле Шателье-Брауна.....	57
I.3.3. Фазы и компоненты мерзлых пород	59

I.4. Термодинамическая теория фазовых и химических превращений.....	66
I.4.1. Общие условия равновесия фазовых и химических превращений в неравновесных системах.....	66
I.4.2. Условия фазового равновесия.. Правило фаз Гиббса. Вариантность системы.....	68
I.4.3. Фазовое равновесие в одно- и двухкомпонентных системах. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса.....	69
I.4.4. Условия химического равновесия. Закон действующих масс.....	78

Глава II. ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ ПОРОВОЙ ВЛАГИ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ 83

II.1. Общие аспекты термодинамического описания равновесия поровой влаги в мерзлых породах.....	84
II.1.1. Равновесие поровой влаги в талых породах.....	84
II.1.2. Специфика описания равновесия поровой влаги в мерзлых породах.....	86
II.1.3. Плоская и капиллярная модели структуры пород. Условия реализации фазового равновесия воды в породах..	88
II.2. Фазовое равновесие воды в мерзлых породах (модель плоской конфигурации поверхности раздела фаз).....	90
II.2.1. Фазовое равновесие и РТ-диаграмма для объемных фаз воды.....	90
II.2.2. Пределы применимости к промерзающим и мерзлым влагонасыщенным породам классического уравнения Клапейрона-Клаузиуса.....	93
II.2.3. Фазовое равновесие при разных давлениях в фазах влаги. Применимость к промерзающим и мерзлым влагонасыщенным породам обобщенного уравнения Клапейрона-Клаузиуса.....	97
II.2.4. Фазовое равновесие влаги во влагонасыщенных супесчаных породах.....	99
II.2.5. Фазовое равновесие влаги в невлагонасыщенных суглинистых породах.....	101
II.3. Фазовое равновесие воды в мерзлых породах под действием различного рода внешней нагрузки.....	102
II.3.1. Специфика перераспределения внешнего давления на поровый лед и незамерзшую воду при промерзании пород по открытой и закрытой схемам.....	103

II.3.2. Фазовое равновесие влаги при изменении гидростатического давления и давления в парогазовой среде	104
II.3.3. Учет механического взаимодействия со скелетом пород. Обобщенная модель Терцаги.....	107
II.3.4. Термодинамические аспекты физико-химической механики, кинетической теории прочности, теории расклинивающего действия водных пленок	109
II.4. Фазовое равновесие воды в мерзлых породах (капиллярная модель с учетом кривизны поверхности раздела фаз).....	120
II.4.1. Фазовое равновесие при учете кривизны конфигурации поверхности раздела фаз поровой влаги с поровым льдом.	121
II.4.2. Фазовое равновесие при учете кривизны конфигурации поверхности раздела фаз влага-водяной пар.	123
Глава III. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ФАЗОВОЕ И АДсорбЦИОННОЕ РАВНОВЕСИЕ ПОРОВОЙ ВЛАГИ В ПОРОДАХ.....	125
III.1. Поверхностные явления. адсорбция	127
III.1.1. Термодинамика малых объектов. Зависимость параметров от дисперсности частиц.....	127
III.1.2. Типы капиллярных эффектов в породах.....	130
III.1.3. Расширенное понятия фазы. Объемные и поверхностные фазы воды. Поверхностные пленки и их аномальные физико-химические свойства.....	132
III.2. Обобщенное правило фаз Гиббса для систем с объемными и поверхностными фазами. Петрофизические модели пород.....	140
III.2.1. Обобщенное правило фаз Гиббса для систем с объемными и поверхностными фазами. Вариантность и полная вариантность систем.....	140
III.2.2. Петрофизические модели многокомпонентных и многофазных пород, включая нефтегазовые коллекторы.....	144
III.2.3. Правило фаз Гиббса-Коржинского. Подвижные и инертные компоненты.....	153

III.3. Адсорбционное взаимодействие компонентов пород.	
Расширенное понятие компонента. модель	
адсорбционного и фазового равновесия	
порового раствора.....	156
III.3.1. Адсорбционные взаимодействия компонентов пород	156
III.3.2. Типы изотерм адсорбции. Термодинамика процесса	
адсорбции	160
III.3.3. Расширенное понятие компонента. Псевдокомпоненты	
различных категорий пресной поровой влаги	168
III.3.4. Оценка параметров фазового и адсорбционного	
равновесия влаги в мерзлых породах по изотермам	
сорбции из жидкой фазы. Формальная аналогия	
константы адсорбционного равновесия и коэффициента	
активности ионов солей. Коэффициенты активности	
поверхностной фазы.....	173
III.3.5. Оценка параметров фазового и адсорбционного	
равновесия влаги с помощью изотерм адсорбции	
из паровой фазы. Эффект межкристаллического	
набухания слоистых силикатов при отрицательных	
температурах	178

III.4 Фазовое и адсорбционное равновесие поровой влаги	
в морозных и морозно иссушающихся породах	188
III.4.1. Специфика адсорбционного и фазового равновесия	
в морозных породах.....	188
III.4.2. Фазовое и адсорбционное равновесие влаги	
в морозно иссушающихся породах	193

Глава IV. ФАЗОВОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ	
ПРИРОДНЫХ МИНЕРАЛИЗИРОВАННЫХ ВОД,	
ПОРОВЫХ РАСТВОРОВ В ЗАСОЛЕННЫХ	
И ОХЛАЖДЕННЫХ ПОРОДАХ	201

IV.1. Термодинамические модели природных	
минерализованных вод. криогенный метаморфизм	
и криогенное концентрирование вод	201
IV.1.1. Химический состав и минерализация природных вод.	
Криогенный метаморфизм и криогенное	
концентрирование морской воды в диапазоне	
отрицательных температур.	201
IV.1.2. Температурные условия формирования ионно-солевого	
состава морской воды и криопеггов. Анализ данных	
по иону хлора и сульфат-иону.	207

IV.1.3. Изменения фазового и химического состава криопэггов в процессе криогенного метаморфизма. Стадийность процесса.....	213
IV.2. Элементы термодинамической теории растворов	216
IV.2.1. Термодинамика идеальных или сильно разбавленных растворов. Законы Рауля и Генри	216
IV.2.2. Реальные растворы. Активность и летучесть. Криоскопия.....	218
IV.2.3. Учет электростатического взаимодействия ионов в растворе. Электролиты.....	221
IV.2.4. Диаграммы состояния бинарных растворов электролитов с эвтектикой, с конгруэнтно и инконгруэнтно плавящимися химическими соединениями.....	224
IV.3. Термодинамические модели природных минерализованных вод.....	230
IV.3.1. Термодинамические модели слабо- и среднеконцентрированных природных вод (электролитов). Теория Дебая-Хюккеля	230
IV.3.2. Модель Питцера и программа для прогноза динамики водно-ионного режима засоленных пород при изменении термобарических условий	233
IV.3.3. Приближенные соотношения для прогноза фазового и химического состава растворов в зависимости от термобарических условий.....	242
IV.4 . Термодинамические модели минерализованных поровых растворов засоленных пород. Криогенный метаморфизм засоленных пород.....	248
IV.4.1. Морской и континентальный тип засоления. Терминологический аспект. Изменения фазового и химического состава поровых растворов в процессе криогенного метаморфизма.....	248
IV.4.2. Модель порового раствора в мерзлых грунтах с морским типом засоления. Бинарный раствор $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$, малые и средние степени засоленности.....	252
IV.4.3. Модель бинарного порового раствора ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$), произвольные значения концентрации.....	258

Глава V. ТЕРМОДИНАМИКА ГАЗОВ И ГАЗОГИДРАТОВ.....	265
V.1. Термодинамика газов.....	265
V.1.1. Газы в породах.....	265
V.1.2. Основные газовые законы. Уравнение Ван-Гоффа. Вириальное уравнение состояния газов	267
V.1.3. Термодинамика природных газов.	270
V.2. Термодинамика газогидратов.	276
V.2.1. Типы и структура газогидратов	276
V.2.2. Фазовое равновесие газогидратов в свободном объеме и в поровом пространстве пород.....	278
V.2.3. Зоны стабильного газогидратообразования в массиве пород. Метастабильное состояние газогидратов (эффект самоконсервации).....	287
Глава VI. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ НЕОБРАТИМЫХ ПРОЦЕССОВ.....	291
VI.1. Законы сохранения энергии, массы и импульса.....	292
VI.1.1. Законы сохранения энергии, массы и импульса	292
VI.1.2. Уравнения потока и производства энтропии	296
VI.2. Феноменологические законы термодинамики необратимых процессов.....	298
VI.2.1. Основные положения и соотношения	298
VI.2.2. Феноменологические коэффициенты переноса тепла и массы. Перекрестные коэффициенты.....	301
VI.2.3. Перекрестные термомагнитные и термоэлектрические эффекты	303
VI.2.4. Калорические эффекты: магнито- и электрокалорический, эластокалорический.....	304
VI.2.5. Магнито- и электрострикция, пьезоэффект	307
VI.3. Взаимодействие полей разной физической природы в мерзлых породах	309
VI.3.1. Электроакустический эффект	309
VI.3.2. Механокалорический эффект в мерзлых породах при одноосном сжатии	311
VI.3.3. Термоэлектрические эффекты.....	313
VI.3.4. Эффект возникновения электрического потенциала при фазовом переходе вода-лед	316

VI.3.5. Электрические эффекты в процессе влагопереноса при промерзании пород. Электроосмос и электрофорез. Двойной электрический слой	319
Глава VII. ТЕРМОДИНАМИКА ИЗЛУЧЕНИЯ.....	324
VII.1. Основные законы термодинамики излучения.....	325
VII.1.1. Закон сохранения энергии для среды с электромагнитным полем. Феноменологические соотношения.....	325
VII.1.2. Аналогия между процессом излучения в газовой среде и молекулярным переносом. Совместное действие излучения и теплопроводности.....	329
VII.1.3. Основные законы термодинамики излучения	331
VII.2. Радиационно-тепловой баланс поверхности пород	338
VII.2.1. Составляющие радиационного баланса поверхности пород	338
VII.2.2. Радиационно-тепловой баланс поверхности.....	344
VII.2.3. Оптические свойства снега и льда. Тепловая инерция.....	348

ЧАСТЬ II

КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И МАССЫ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

Глава VIII. КИНЕТИКА ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И МАССЫ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ КАК НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ.....	357
VIII.1. Описание теплопереноса в мерзлых породах как неоднородных средах	358
VIII.1.1. Уравнение теплопроводности как частный случай первого закона термодинамики для однородной среды...358	
VIII.1.2. Учет пространственной неоднородности массива мерзлых пород.....	361
VIII.1.3. Учет энергетической неоднородности за счет процессов массопереноса, фазовых и химических превращений	363
VIII.2. Массоперенос в мерзлых породах как неоднородных средах.....	368

VIII.2.1. Уравнения переноса массы – частные случаи законов переноса массы и импульса.....	368
VIII.2.2. Количественное описание массопереноса в породах, имеющих структурную и энергетическую неоднородность.....	369
VIII.2.3. Учет влияния неоднородности структуры незамерзшей (связанной) воды.....	375
VIII.2.4. Учет влияния капиллярно-пористой структуры пород на влагоперенос по паровой и жидкой фазам	378
VIII.3. Массоперенос в неоднородном температурном поле мерзлых пород	383
VIII.3.1. Перенос жидкой фазы в неоднородном температурном поле пород. Миграция незамерзшей воды.	383
VIII.3.2. Пароперенос в неоднородном температурном поле.....	388
Глава IX. КИНЕТИКА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ, ХИМИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ	391
IX.1. Кинетика фазовых переходов в мерзлых породах	391
IX.1.1 Возникновение и рост новой фазы	391
IX.1.2. Учет кинетики фазовых переходов и эффекта переохлаждения влаги на фронте промерзания.....	393
IX.1.3. Учет кривизны и поверхностного натяжения на границах раздела фаз. Фазовые переходы в условиях вакуума и различной величины гравитационной постоянной.....	397
IX.1.4 Гистерезис равновесных характеристик и кинетических свойств пород как термодинамически необратимый процесс. Гипотеза о тождественности.....	402
IX.2. Кинетика химических и других взаимодействий в мерзлых породах	407
IX.2.1. Влияние кинетики химических реакций на влагосолеперенос. Фронтальная и объемная формы реакции.....	407
IX.2.2. Соотношение скоростей диффузии влаги и химических реакций. Внутренняя и внешняя реакционная поверхности пород	409
IX.2.3. Кинетика разложения газогидрата.....	411
IX.2.4. Кинетика радиоактивного распада и бактериального роста	414

IX.3. Кинетика переноса легкорастворимых солей, тяжелых элементов, радионуклидов, органических и биологических примесей в мерзлых породах	418
IX.3.1. Многокомпонентная диффузия и приближение независимой диффузии ионов легкорастворимых солей. Коэффициенты диффузии	418
IX.3.2. Коэффициенты переноса органических и биологических примесей	422
IX.3.3. Кинетика переноса тяжелых элементов и радионуклидов	425

ЧАСТЬ III ДИНАМИКА МЕРЗЛОТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Глава X. ОСНОВЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ПРОГНОЗА ПРОЦЕССОВ ПРОМЕРЗАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ ПОРОД	427
X.1. Моделирование в геокриологии (мерзловедении)	427
X.1.1. Методы физического моделирования геокриологических процессов	428
X.1.2 Методы численного эксперимента	429
X.1.3 Этапы моделирования количественных закономерностей процесса	432
X.2. Методы решения краевых задач теплопроводности (диффузии) с учетом фазовых переходов	434
X.2.1. Аналитические методы решения линейных (разделение переменных, интегральные) и нелинейных (малого параметра, вариационные, интеграл теплового баланса) задач типа теплопроводности при наличии фазовых переходов.	434
X.2.2. Численные методы решения задач при наличии фазовых переходов	441
X.2.3. Методы теории обобщенных переменных (критериев подобия).	443
Глава XI. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ ПОРОД НА ОСНОВЕ РАССМОТРЕНИЯ ТОЛЬКО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТОРОНЫ ПРОЦЕССА	447

XI.1. Постановка задач сезонного промерзания–оттаивания пород на основе использования моделей с явным выделением фронта фазового перехода (задача типа Стефана).....	448
XI.1.1. Постановка задачи о сезонном промерзании пород с массивной криогенной текстурой.	449
XI.1.2. Задача Стефана. Автомодельное решение. Аппарат и физическая интерпретация метода возмущений (малого параметра)	451
XI.1.3. Учет эффекта переохлаждения влаги на фронте промерзания и кинетики фазовых переходов	457
XI.1.4. Учет периодичности изменения температурных условий на поверхности пород.....	462
XI.1.5. Динамика процесса сезонного промерзания–оттаивания при учете теплообмена с подстилающими породами.....	464
XI.1.6. Периодически установившийся температурный режим. Формула Кудрявцева.....	467
XI.1.7. Динамика процесса сезонного промерзания–оттаивания при учете теплообмена с подстилающими породами и приземным слоем воздуха, наличия на поверхности снежного покрова	473
XI.1.8. Динамика процесса промерзания водоносного слоя при учете наличия на поверхности снежного покрова, теплообмена с приземным слоем воздуха и продольно фильтрующейся водой.....	477
XI.1.9. Динамика промерзания при произвольном и заданном виде зависимости мощности снежного покрова и температуры дневной поверхности от времени	479
XI.2. Нахождение динамики мощности слоя сезонного промерзания–оттаивания пород с помощью обобщенных переменных – критериев подобия	486
XI.2.1. Критерии подобия, используемые для описания процесса сезонного промерзания пород.....	486
XI.2.2. Вид критериальных соотношений для оценки динамики сезонного промерзания–оттаивания пород	489
XI.2.3. Вид критериальных соотношений для задач промерзания в спектре температур (с зоной фазового перехода)	491

Глава XII. МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОМЕРЗАНИЯ –ОТТАИВАНИЯ, МОРОЗНОГО ИССУШЕНИЯ ПОРОД С УЧЕТОМ ВЛАГОПЕРЕНОСА И ЛЬДОВЫДЕЛЕНИЯ..... 494

XII.1. Системы уравнений тепловлагодпереноса с учетом фазовых переходов..... 494

- XII.1.1. Общий вид системы уравнений тепломассопереноса
в капиллярно-пористых системах 494
- XII.1.2. Система уравнений тепломассопереноса в мерзлых
и промерзающих породах. 495
- XII.1.3. О применимости миграционных и фильтрационных
моделей для описания процесса..... 499
- XII.1.4. Задачи с явным выделением фронта фазового
перехода и без явного выделения..... 501

XII.2. Промерзание пород с учетом пучения 503

- XII.2.1. Промерзание пород с учетом ритмичности образования
ледяных прослоек в промерзающей зоне 503
- XII.2.2. Механизм и методы прогноза процесса пучения пород.... 506
- XII.2.3. Методы расчета вертикальной деформации пучения
с использованием коэффициентов влагодпереноса..... 508
- XII.2.4. Методы расчета вертикальной деформации пучения
с учетом интенсивности влагодпереноса
в неявной форме..... 510

XII.3. Моделирование тепловлагодпереноса с учетом морозного иссушения при различных термобарических условиях 512

- XII.3.1. Механизм процесса морозного иссушения
в мерзлых породах..... 513
- XII.3.2. Общая постановка задачи тепловлагодпереноса
с учетом морозного иссушения дисперсных пород
в условиях атмосферного давления. 515
- XII.3.3. Сублимация льда в непылеватых песках.
Задача типа Стефана..... 521
- XII.3.4. Иссушение суглинистых пород при температурах
ниже $-5...-7^{\circ}\text{C}$ (модель с явным выделением фронта
фазового перехода) 524
- XII.3.5. Иссушение супесчаных пород в диапазоне температур
ниже $-5...-7^{\circ}\text{C}$ (модель объемного фазового перехода).
Метод интегрального преобразования Лапласа..... 527

XII.3.6. Трехзонная модель процесса иссушения суглинистых дисперсных пород в области отрицательных температур выше $-5...-7^{\circ}\text{C}$	529
XII.3.7. Влияние давления воздушной среды на тепловлажностный режим мерзлых пород при небольшой (условия высокогорья) и высокой степени ее разрежения	531
XII.4. Моделирование многофронтных и многомерных задач теплопереноса.....	536
XII.4.1. Взаимодействие фронта промерзания с газогидратной залежью. Учет давления вышележащих толщ.....	536
XII.4.2. Задача об абляции поверхности мерзлых пород. Термоэрозия и термоабразия	539
Глава XIII. МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОМЕРЗАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ ЗАСОЛЕННЫХ ПОРОД С УЧЕТОМ ТЕПЛО- И ВЛАГОСОЛЕПЕРЕНОСА	544
XIII.1. Модели с явным выделением фронта фазового перехода и объемным промерзанием	545
XIII.1.1. Система уравнений тепловлагопереноса в засоленных породах.....	545
XIII.1.2. Диффузионная модель теплосолепереноса при допущении о поршневом механизме отжатия солей от фронта промерзания.....	546
XIII.1.3. Модель объемного промерзания (без явного выделения фронта) с учетом диффузионного солепереноса в мерзлой зоне и эффекта захвата солей льдом	548
XIII.2. Моделирование температурного и водно-ионного режима засоленных пород и криопэгов при изменении термобарических условий	550
XIII.2.1. Динамика оттаивания мерзлых пород шельфа в субаквальных условиях в ходе позднеплейстоценовой-голоценовой трансгрессии. Автомодельное приближение.	550
XIII.2.2. Прогнозное моделирование температурного и водно-ионного режима засоленных мерзлых пород и криопэгов, при учете преобразования химического состава поровых растворов и тренда повышения температуры воздуха	558

XIII.2.3. Методика количественной оценки теплофизических параметров расчетной схемы.....	566
--	-----

Глава XIV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЕРЗАНИЯ ПОРОД С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И МАССЫ С ПОЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ.....571

XIV.1. Теплоперенос при механическом воздействии.....571

XIV. 1.1. Теплоперенос в упруго деформируемом массиве. Связанная и несвязанная задача термоупругости.....	571
XIV.1.2. Моделирование процесса морозобойного растрескивания пород	576
XIV.1.3. Трещинообразование при интенсивном низкотемпературном воздействии (тепловой удар).....	584

XIV.2. Влагоперенос при механическом воздействии на массив592

XIV.2.1. Миграция влаги под действием сдвиговых и сжимающих нагрузжений и в пластически деформируемом массиве.....	592
XIV.2.2. Деформации при гидроразрыве пласта (гидравлический удар).....	595

XIV.3. Моделирование процесса промерзания пород с учетом взаимодействия полей температуры и массы с полями напряжений и деформаций602

XIV.3.1. Модель О'Нейла-Миллера и ее модификация Я.Б. Гореликом	602
XIV.3.2. Термореологическая модель	610
XIV.3.3. Термомеханическая модель.....	612
XIV.3.4. Модель В.Н. Разбегина	615

Литература619