

Б.П. Вейнберг

**Лед. Свойства, возникновение и
исчезновение льда**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 55
ББК 26.3
Б11

Б11 **Б.П. Вейнберг**
Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда / Б.П. Вейнберг – М.: Книга по Требо-
ванию, 2024. – 524 с.

ISBN 978-5-458-59590-2

ISBN 978-5-458-59590-2

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг — не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель — вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания — решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

СОДЕРЖАНИЕ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

СВОЙСТВА ЛЬДА

I. Термодинамика превращений воды

Б. П. Вейнберг

§ 1. Различные понимания слова «лед» и принципы классификации различных видов льда	13
§ 2. Значение льда для геофизических процессов и для материальной культуры человечества	19
§ 3. Противоречия между значением льда для человека и объемом и глубиной сведений о нем	21
§ 4. Устойчивое равновесие и превращения фаз	24
§ 5. Влияние добавочного давления на температуру перехода	29
§ 6. Замерзание растворов	32
§ 7. Превращения фаз при неустойчивом равновесии	36
§ 8. Превращения фаз в неизолированной системе	41
§ 9. Превращения фаз воды при естественном расположении слоев различных фаз	45
§ 10. Превращения фаз воды при неестественном расположении слоев различных фаз	49
§ 11. Превращения фаз воды при перемешивании	51
§ 12. Превращения трехфазной системы лед—вода—водяной пар	55
§ 13. Превращения фазы воды на поверхности тела конечных размеров, имеющего температуру, отличную от температуры этой фазы	61
§ 14. Превращения фазы воды на поверхности бесконечно простирающейся среды с температурой, отличной от температуры фазы	67
§ 15. Режеляция или смерзание льда	73
§ 16. Рекристаллизация льда	87
§ 17. Миграция включений соляных растворов во льде	88

II. Числовые характеристики условий превращения водяного пара и жидкой воды в твердое состояние

Б. П. Вейнберг

§ 1. Постановка вопроса	92
§ 2. Упругости пара, насыщающего пространство над льдом и над переохлажденной водой	96
§ 3. Температуры плавления льда при различных давлениях	101
§ 4. Теплоемкости льда и переохлажденной воды в зависимости от температуры	107
§ 5. Теплота плавления чистого льда	111
§ 6. Теплоемкость и теплота плавления соленого льда	115
§ 7. Плотность чистого льда при 0°	118

	Стр.
8. Плотность соленого льда	124
9. Зависимость плотности льда от температуры и давления	126
10. Плотность и другие свойства переохлажденной воды	130
11. Теплота вогонки льда	132
12. Температура и давление в тройной точке воды	132
13. Способность к самопроизвольной кристаллизации у переохлажденной воды	135
14. Скорость кристаллизации переохлажденной воды	154
15. Теплопроводность льда и переохлажденной воды	160
16. Скользкость льда	163

III. Механические, оптические и другие свойства льда

Б. П. Вейнберг (§ 1—12), А. Ф. Каванский (§ 13)

1. Классификация механических свойств льда	171
2. Предел упругости льда	173
3. Оценка порядка величины предела упругости льда на основании приложения теории релаксации	177
4. Упругие постоянные льда	181
5. Коэффициент Пуассона у льда	189
6. Поведение льда при действии сил, превышающих предел упругости	190
7. Коэффициент внутреннего трения льда	193
8. Выдавливание льда через отверстие	195
9. Значение определений предела пластичности льда	198
10. Сводка опытных данных по определениям предела пластичности льда	201
11. Электрические и магнитные свойства льда	215
12. Оптические свойства льда	217
13. Микрофлора льда	221

IV. Структура льда

В. Я. Альтберг

1. Расположение атомов в кристаллической решетке льда по данным рентгенографического анализа	228
2. Расположение электронов в молекуле воды и молекул воды относительно друг друга	230
3. Данные исследования методом спектров Рамана	234
4. Вероятное соотношение между жидким и твердым состоянием вещества вообще и в частности воды	236

V. Некоторые свойства снежного покрова

Б. П. Вейнберг (§ 1, 3, 5 и 6),

С. М. Горленко по А.-Б. Добровольскому (§ 2 и 4)

1. Трудности и значение изучения свойств снега	239
2. Плотность различных слоев снежного покрова	242
3. Процесс увеличения плотности снежного покрова	243
4. Теплопроводность снежного покрова	246
5. Радиационные свойства снежного покрова	252
6. Механические свойства снега	253

VI. Общая кристаллография льда

Б. П. Вейнберг (§ 1), М. П. Головков (§ 2, 16),
А.-Б. Добровольский (§ 3—15)

§ 1. Наблюдательный материал по кристаллографии льда	259
§ 2. Обзор взглядов на кристаллическую систему льда	264
§ 3. Сводка результатов по общей кристаллографии льда	264
§ 4. Одноосность кристаллов льда	265
§ 5. Принадлежность кристаллов льда к гексагональной системе	265
§ 6. Принадлежность кристаллов льда к тригональному типу гексагональной системы	267
§ 7. Гемоморфизм кристаллов льда	272
§ 8. Принадлежность кристаллов льда к классу L_3P гексагональной системы	275
§ 9. Экспериментальные методы определения симметрии кристаллов льда	276
§ 10. Три главных вида льда (пластинчатый, стержневидный, игольчатый)	276
§ 11. Факторы изменчивости видов у кристаллов льда	278
§ 12. Сrostки	278
§ 13. Кристаллографическая постоянная льда	279
§ 14. Полиморфизм льда	280
§ 15. Лед Барендрехта и Валлерана	281
§ 16. Некоторые данные по кристаллографии морского льда	282

VII. Общая петрография льда.

Б. П. Вейнберг (§ 1), А.-Б. Добровольский (§ 2, 3),
М. П. Головков (§ 4)

§ 1. Лед как горная порода	285
§ 2. Магматические ледяные породы (по классификации Добровольского).	285
§ 3. Осадочные ледяные породы (по классификации Добровольского).	288
§ 4. Некоторые данные о петрографии морского льда [1].	289

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ОБРАЗОВАНИЕ И СУДЬБЫ ЛЬДА В ПРИРОДЕ

VIII. Возникновение льда в атмосфере

Б. П. Вейнберг

§ 1. Значение вопросов об образовании и судьбах различных видов льда в природе	297
§ 2. Неустойчивость водяного пара в атмосфере	298
§ 3. Непостоянство атмосферного льда (по Добровольскому)	300
§ 4. Ядра кристаллизации атмосферного льда	301
§ 5. Условия возникновения атмосферного льда	308
§ 6. Состав снега	311

IX. Генезис и особенности различных видов еублимационного льда

Б. П. Вейнберг

§ 1. Льдистые облака и туманы и условия роста их элементов	314
§ 2. Размеры и форма снежинок в связи с метеорологическими условиями на пути их падения	318

	Стр.
§ 3. Алмазная пыль	323
§ 4. Хлопья снега (по Добровольскому)	324
§ 5. Крупа (по Добровольскому)	326
§ 6. Иней и изморозь	328
§ 7. Морозные узоры на окнах	333
§ 8. Пещерный и почвенный сублимационный лед	336

X. Оптические явления в атмосфере, вызываемые наличием в ней ледяных кристаллов

Е. И. Тихомиров

§ 1. Классификация оптических явлений, зависящих от присутствия ледяных кристаллов в атмосфере	339
§ 2. Теоретические объяснения оптических явлений, зависящих от присутствия ледяных кристаллов в атмосфере	340
§ 3. Роль дифракции в оптических явлениях, зависящих от присутствия ледяных кристаллов в атмосфере	345

XI. Генезис и особенности различных форм водного льда

Б. П. Вейнберг

§ 1. Ледяной дождь	347
§ 2. Град	348
§ 3. Гололед	355
§ 4. Сосульки, водный, пещерный и почвенный лед	357
§ 5. Классификация случаев образования водного льда в гидросфере	358
§ 6. Физические и геофизические условия ледообразования	
§ 7. Калорический режим водоема и водотока перед образованием ледового покрова с качественной стороны	360
	362

XII. Формы образования ледяного покрова водоемов

В. И. Арнольд-Алябьев

§ 1. Различные формы ледяного покрова и их систематика	371
§ 2. Терминология морских ледяных образований	373
§ 3. Количественные характеристики степени покрытости льдом поверхности водоема	381
§ 4. Виды пресколовых ледяных образований	383
§ 5. Строение ледяного покрова	385
§ 6. Твердые и органические включения в ледяной покров	389

XIII. Рост и истончение ледяного покрова

Б. П. Вейнберг (§ 1 и 2), А. А. Шепелевский (§ 3 и 4),
В. И. Арнольд-Алябьев (§ 5)

§ 1. Классификация методов выражения закономерностей изменения толщины ледяного покрова с течением времени	392
§ 2. Геофизически-эмпирические формулы для изменений толщины льда с течением времени	396
§ 3. Энергетически-эмпирические формулы изменения толщины льда с течением времени	396
§ 4. Климатологически-эмпирические формулы для изменения толщины льда с течением времени	400
§ 5. Таяние ледяного покрова	405

XIV. Снежный покров и его динамика

Б. П. Вейнберг (§ 1 и 6),

С. М. Горленко по А.-Б. Добровольскому (§ 2—5)

§ 1. Виды снежного покрова	410
§ 2. Движение снега в случае препятствия, свободно взвешенного в воздухе	419
§ 3. Образование вынужденных наносов	425
§ 4. Волнообразные наносы	430
§ 5. Снежный покров в области наносов	434
§ 6. Судьбы снежного покрова	438

XV. Ледниковый покров и его судьбы

Б. П. Вейнберг

§ 1. Движение льда в ледниках	441
§ 2. Кинематика движения льда в ледниках	446
§ 3. Кинетические теории движения льда в ледниках	452

XVI. Лед вечно мерзлых грунтах

М. И. Сумгин

§ 1. Классификация мерзлых грунтов по продолжительности их существования	460
§ 2. Географическое распространение вечной мерзлоты	462
§ 3. Мощность вечной мерзлоты	464
§ 4. Типы льда, заключенного в вечной мерзлоте	464
§ 5. Количественные характеристики мерзлых грунтов	468
§ 6. Миграция воды в процессе замерзания грунта	473
§ 7. Пучение грунтов (наледные явления)	479
§ 8. Механические свойства мерзлых грунтов	484
§ 9. Особенности теплового режима в деятельном слое	485

XVII. Общая геология льда

Г. Ф. Мирчинк

§ 1. Современное обледенение земного шара	491
§ 2. Ледниковые века	491
§ 3. Причины ледниковых веков	494
Добавление I	496
Добавление II	500
Добавление III	511
Добавление IV	
Алфавитный список авторов	

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

СВОЙСТВА ЛЬДА

ГЛАВА I

ТЕРМОДИНАМИКА ПРЕВРАЩЕНИЙ ВОДЫ

В. П. ВЕЙНБЕРГ

§ 1. Различные понимания слова «лед» и принципы классификации различных видов льда

Слово «лед» понимается обычно тройным образом.

1. Как твердая фаза «воды» — химического соединения состава H_2O — независимо от того, получена ли эта фаза искусственно или образовалась естественным путем в природе.

2. Как особая форма воды в твердом состоянии, характеризующаяся отсутствием внешней кристаллографической формы и сплошностью (лед озерный, речной, морской, ледниковый и искусственный и даже льдинки, выпадающие летом из облаков и называемые в этом случае градинами), в отличие от таких форм воды в твердом состоянии, как снег, изморозь, иней.

3. Как вода в твердом состоянии в природе, независимо от формы, в какой она встречается.

Первое и второе понимания можно назвать *физическими*, причем второе по существу является *генетически-физическим* в связи с тем, что формы воды в твердом состоянии, называемые «льдом» в этом смысле, получаются от превращения воды в твердое состояние из жидкой воды, тогда как снег, изморозь, иней — от превращения в твердое состояние водяного пара. Третье же понимание можно считать *геофизическим*, так как оно подводит нас к понятию льда с точки зрения встречаемости воды в твердом состоянии на земном шаре.

Мы будем в дальнейшем придерживаться последнего понимания слова «лед», хотя оно только теперь начинает завоевывать себе право гражданства. Мы будем понимать, таким образом, под льдом всякую воду в твердом состоянии в природе, вне зависимости от того, в какой сфере земного шара — в атмосфере, гидросфере или литосфере — находится этот лед, и от того, путем каких изменений агрегатного состояния получился этот лед и какие геофизические процессы вызвали эти процессы, а также вне зависимости от степени химической чистоты рассматриваемого льда, от внешней геометрической формы отдельных кусков льда, с какими мы имели дело, и, наконец, от формы залегания этих кусков, если речь будет идти о льде в литосфере.

При таком понимании наиболее крупное затруднение, — пожалуй, единственное — будут представлять случаи, когда «лед» не заполняет собой сплошь всей той части пространства на земном шаре, где он находится и где он является лишь отдельной фазой многофазной системы, которая может быть практически или теоретически отделена от остальных фаз механическим путем.

Примеры: снежный покров; фирн; вода, несущая шугу; донный лед; морской лед (строго говоря, любой лед, получившийся путем замерзания жидкой, не химически чистой воды); лед, заключающий пузырьки воздуха тех или иных размеров; лед со включением «твердых частиц»; лед, составляющий часть «льдиистой породы» [1] или «мерзлого грунта» [2]. В таких случаях мы будем понимать под льдом не только те куски воды в твердом состоянии, которые более или менее явно выделяются среди остальных фаз системы, но и те более или менее сплошные массы такой многофазной системы, в которых остальные фазы не играют доминирующей роли. Установление границы, до которой такой лед нужно рассматривать, как лед с примесями, а по переходе через которую сам лед является примесью, конечно, условно, так как в подобных случаях количество лишь постепенно переходит в качество. Однако, поскольку такая оговорка сделана, нам думается, что не может возникнуть никаких недоразумений относительно того, что морской лед даже весьма большой солености или «вечная мерзлота» с большой «льдонасыщенностью» ([2], стр. 111) является все-таки льдом, а мирабилит, осаждающийся на дне Карабугаза зимой и заключающий в виде прослоек «лед», не есть лед.

Мы в сущности подошли вплотную к вопросу о классификации различных видов льда, как мы будем называть категории льда, различающиеся по одному из перечисленных выше признаков, не прибегая по возможности ни к слову «формы» льда, которое мы сохраним для характеристики внешней поверхности отдельных кусков льда, ни к более или менее неопределенному термину «разновидность».

Отметим сразу недостаточную согласованность и даже несистематичность как в классификации различных видов льда, так и в характеристиках и названиях их. Это обстоятельство, с одной стороны, позволит нам не быть слишком ригористичными в классификации, а с другой стороны, будет побуждать нас по возможности уточнять терминологию, относящуюся к различным видам льда, указывая в то же время степень общепринятости ее в каждом отдельном случае.

Остановимся прежде всего на подразделении видов льда по нескольким основным категориям — на первичной классификации льдов — и отметим сразу, что различные авторы предлагают различные принципы как для этой, так и для более дробной или вторичной классификации. Принципам этим можно дать следующие названия: