

ЛУЧШИЙ ЗАРУБЕЖНЫЙ УЧЕБНИК

3 Li 6.941 ЛИТИЙ	4 Be 9.0122 БЕРИЛЛИЙ		
11 Na 22.989769 НАТРИЙ	12 Mg 24.3050 МАГНИЙ		
19 K 39.0983 КАЛИЙ	20 Ca 40.078 КАЛЬЦИЙ	21 Sc 44.955910 СКАНДИЙ	22 Ti 47.88 ТИТАН
37 Rb 85.4678 РУБИДИЙ	38 Sr 87.62 СТРОНЦИЙ	39 Y 88.905848 ИТРИЙ	40 Zr 91.224 ЦЕЛЕНИЙ

Н. ГРИНВУД
А. ЭРШО

ХИМИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

1



УНИВЕРСИТЕТ
БИНОМ

ХИМИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

Chemistry of the Elements

Second Edition

N. N. Greenwood and A. Earnshaw

School of Chemistry
University of Leeds, U.K.

BUTTERWORT
HEINEMAN

Oxford Amsterdam Boston London New York Paris
San Diego San Francisco Singapore Sydney Tokyo



ЛУЧШИЙ ЗАРУБЕЖНЫЙ УЧЕБНИК

Н. Гринвуд, А. Эрншо

ХИМИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

В двух томах

1

3-е издание

Перевод с английского
профессора, д-ра хим. наук В. А. Михайлова,
профессора, д-ра хим. наук Е. В. Савинкиной,
канд. хим. наук Ю. И. Азимовой,
канд. хим. наук Е. Э. Григорьевой,
Н. М. Логачевой,
канд. хим. наук Л. Ю. Аликперовой



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний

УДК 541
ББК 24.12я2
Г82

Серия основана в 2006 г.

Гринвуд Н.

Г82 Химия элементов : в 2 т. Т. 1 / Н. Гринвуд, А. Эрншо ; пер. с англ. — 3-е изд. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 607 с. : ил. — (Лучший зарубежный учебник).

ISBN 978-5-9963-1733-2 (Т. 1)

ISBN 978-5-9963-1732-5

В фундаментальном учебном издании английских авторов химия элементов представлена как развивающаяся дисциплина, объединяющая разные области науки — неорганическая, аналитическая, теоретическая, металлоорганическая, бионеорганическая химия и химическая технология. Огромный фактический материал изложен в рамках современных теоретических концепций. Вводные главы посвящены общим вопросам: происхождение и распространённость элементов, периодичность изменения химических свойств в зависимости от положения элемента в Периодической системе. В последующих главах систематически изложена химия одного из элементов или группы родственных элементов. Книга хорошо иллюстрирована, содержит обширный справочный материал и подробную библиографию.

В русском издании книга выходит в двух томах. Том 1 включает главы 1–14.

Для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей химических факультетов и вузов, а также научных сотрудников и широкого круга специалистов.

УДК 541
ББК 24.12я2

Учебное издание

Серия: «Лучший зарубежный учебник»

Гринвуд Норман
Эрншо Алан

ХИМИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

В двух томах

Том 1

Ведущий редактор канд. хим. наук *Т. И. Почкаева*. Редактор канд. хим. наук *Е. Э. Григорьева*

Художники *И. Е. Марев, Н. А. Новак*

Технический редактор *Е. В. Денюкова*

Компьютерная верстка: *О. А. Пелипенко*

Подписано в печать 22.07.14. Формат 84×108/16.

Усл. печ. л. 63,84. Тираж 1500 экз. Заказ

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272, e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

Copyright © 1984, 1997, Elsevier Ltd. All rights reserved
This edition of *Chemistry of the Elements* by
N. N. Greenwood and A. Earnshaw, ISBN 978-0750633659, is
published by arrangement with Elsevier Ltd, The Boulevard,
Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, England.
Это издание *Chemistry of the Elements* авторов
Н. Н. Гринвуда и А. Эрншо опубликовано в соответствии
с соглашением с издательством Elsevier Ltd.
© перевод, оформление, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015

ISBN 978-5-9963-1733-2 (Т. 1)

ISBN 978-5-9963-1732-5

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ	7
ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ	8
ГЛАВА 1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ. ИЗОТОПЫ И АТОМНЫЕ МАССЫ	10
1.1. Введение	10
1.2. Происхождение Вселенной	10
1.3. Распространенность элементов во Вселенной	11
1.4. Эволюция звезд и их спектральные классы	14
1.5. Синтез элементов	17
1.5.1. Горение водорода	17
1.5.2. Горение гелия и углерода	18
1.5.3. α -Процесс	19
1.5.4. e -Процесс (равновесный процесс)	20
1.5.5. s -, r -Процессы (медленный и быстрый захват нейтронов)	20
1.5.6. p -Процесс (захват протона)	21
1.5.7. x -Процесс	21
1.6. Атомные массы	23
1.6.1. Неопределенность атомных масс	24
1.6.2. Проблема радиоактивных элементов	26
Литература	27
ГЛАВА 2. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРИОДИЧНОСТЬ И ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА	28
2.1. Введение	28
2.2. Электронное строение атомов	28
2.3. Периодическое изменение свойств элементов	30
2.3.1. Изменение атомных и физических свойств	30
2.3.2. Закономерности в изменении химических свойств	33
2.4. Предсказание новых элементов и соединений	35
Литература	38
ГЛАВА 3. ВОДОРОД	39
3.1. Введение	39
3.2. Атомные и физические свойства водорода	40
3.2.1. Изотопы водорода	40
3.2.2. Орто- и пара-водород	41
3.2.3. Ионизированные формы водорода	43
3.3. Получение, производство и применение	44
3.3.1. Водород	44
3.3.2. Дейтерий	46
3.3.3. Тритий	46
3.4. Химические свойства	49
3.4.1. Координационная химия водорода	50
3.5. Протонные кислоты и основания	53
3.6. Водородная связь	57
3.6.1. Влияние на свойства	58
3.6.2. Влияние на структуру	61
3.6.3. Прочность водородных связей и их теоретическое описание	65
3.7. Водородные соединения элементов	68
Литература	71

ГЛАВА 4. ЛИТИЙ, НАТРИЙ, КАЛИЙ, РУБИДИЙ, ЦЕЗИЙ И ФРАНЦИЙ	74
4.1. Введение	74
4.2. Элементы	74
4.2.1. Открытие и выделение	74
4.2.2. Распространенность и нахождение в природе	75
4.2.3. Производство и использование металлов	76
4.2.4. Атомные и физические свойства	80
4.2.5. Химические свойства	81
4.2.6. Растворы в жидком аммиаке и других растворителях	82
4.3. Соединения	84
4.3.1. Модель ионной связи	84
4.3.2. Галогениды и гидриды	86
4.3.3. Оксиды, пероксиды, надпероксиды и субоксиды	88
4.3.4. Гидроксиды	90
4.3.5. Соли оксокислот и другие соединения	91
4.3.6. Координационная химия	94
4.3.7. Имиды, амиды и родственные соединения	101
4.3.8. Металлоорганические соединения	104
Литература	107
ГЛАВА 5. БЕРИЛЛИЙ, МАГНИЙ, КАЛЬЦИЙ, СТРОНЦИЙ, БАРИЙ И РАДИЙ	110
5.1. Введение	110
5.2. Элементы	111
5.2.1. Распространенность и нахождение в природе	111
5.2.2. Производство и применение металлов	112
5.2.3. Атомные и физические свойства	113
5.2.4. Химические свойства	115
5.3. Соединения	115
5.3.1. Введение	115
5.3.2. Гидриды и галогениды	117
5.3.3. Оксиды и гидроксиды	121
5.3.4. Соли оксокислот и координационные соединения	123
5.3.5. Металлоорганические соединения	126
Бериллий	126
Магний	131
Кальций, стронций и барий	136
Литература	137
ГЛАВА 6. БОР	139
6.1. Введение	139
6.2. Бор [1]	139
6.2.1. Выделение и очистка простого вещества	139
6.2.2. Структура кристаллического бора	140
6.2.3. Атомные и физические свойства бора	142
6.2.4. Химические свойства	144
6.3. Бориды	145
6.3.1. Введение	145
6.3.2. Получение и стехиометрия	145
6.3.3. Структуры боридов	146
6.4. Бораны (гидриды бора)	150
6.4.1. Введение	150
6.4.2. Образование связей и топология	156
6.4.3. Получение и свойства боранов	160
6.4.4. Химия малых боранов и борогидридных анионов (B_1 – B_4)	161
6.4.5. Бораны и борогидридные анионы среднего размера (B_5 – B_9)	167
6.4.6. Химия нидо-декаборана $B_{10}H_{14}$	169
6.4.7. Химия клозо- $B_nH_n^{2-}$	174
6.5. Карбораны	175

6.6.Metalлокарбораны	182
6.7.Галогениды бора	187
6.7.1.Тригалогениды бора	187
6.7.2.Низшие галогениды бора	191
6.8.Кислородные соединения бора	194
6.8.1.Оксиды и оксокислоты бора	194
6.8.2.Бораты	196
6.8.3.Органические соединения со связью бор–кислород	198
6.9.Соединения бора с азотом	198
6.10.Другие соединения бора	202
6.10.1.Соединения, содержащие связи атомов бора с атомами фосфора, мышьяка или сурьмы	202
6.10.2.Соединения, содержащие связи атомов бора с атомами серы, селена и теллура	203
Литература	205
ГЛАВА 7. АЛЮМИНИЙ, ГАЛЛИЙ, ИНДИЙ И ТАЛЛИЙ	208
7.1.Введение	208
7.2.Элементы	209
7.2.1.Распространенность и нахождение в природе	209
7.2.2.Получение и использование металлов	210
7.2.3.Атомные и физические свойства	213
7.2.4.Химические свойства	216
7.3.Соединения	218
7.3.1.Гидриды и родственные соединения	218
7.3.2.Галогениды и галогенидные комплексы	223
Тригалогениды алюминия	223
Тригалогениды галлия, индия и таллия	226
Низшие галогениды галлия, индия и таллия	229
7.3.3.Оксиды и гидроксиды	231
7.3.4.Тройные и более сложные оксиды	235
Шпинели и родственные соединения	235
Натриевый β -глинозем и родственные фазы	237
Алюминат трикальция $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	238
7.3.5.Другие неорганические соединения	239
Халькогениды	239
Соединения, содержащие связи с N, P, As, Sb или Bi	242
Некоторые соединения с необычной стереохимией	243
7.3.6.Металлоорганические соединения	245
Алюминийорганические соединения	245
Металлоорганические соединения галлия, индия и таллия	249
Гетероциклы и кластеры со связью Al–N ₆	251
Литература	253
ГЛАВА 8. УГЛЕРОД	255
8.1.Введение	255
8.2.Углерод	256
8.2.1.Распространенность и нахождение в природе	256
8.2.2.Аллотропные формы	260
8.2.3.Атомные и физические свойства	262
8.2.4.Фуллерены	264
Строение фуллеренов	266
Другие аллотропные формы углерода	267
Химия фуллеренов	268
8.2.5.Химические свойства углерода	273
8.3.Соединения включения графита	276
8.4.Карбиды	280
Металлокарбоздрены (меткары)	283
8.5.Гидриды, галогениды и оксогалогениды	284
8.6.Оксиды и карбонаты	288

8.7. Халькогениды и родственные соединения	295
8.8. Цианиды и другие соединения со связью углерод-азот	299
8.9. Металлоорганические соединения	305
Литература	305
ГЛАВА 9. КРЕМНИЙ	310
9.1. Введение	310
9.2. Кремний	311
9.2.1. Распространенность и нахождение в природе	311
9.2.2. Выделение, промышленное производство и технологическое применение	311
9.2.3. Атомные и физические свойства	312
9.2.4. Химические свойства	313
9.3. Соединения	316
9.3.1. Силициды	316
9.3.2. Гидриды кремния (силаны)	317
9.3.3. Галогениды кремния и родственные комплексы	320
9.3.4. Диоксид кремния и кремниевые кислоты	322
9.3.5. Силикатные минералы	326
Силикаты, содержащие дискретные анионы (островные силикаты)	327
Цепочечные силикаты	328
Слоистые силикаты	329
Каркасные силикаты	334
9.3.6. Другие неорганические соединения кремния	338
9.3.7. Кремнийорганические соединения и полимеры на их основе (силиконы)	340
Литература	344
ГЛАВА 10. ГЕРМАНИЙ, ОЛОВО, СВИНЕЦ	347
10.1. Введение	347
10.2. Элементы	348
10.2.1. Распространенность и нахождение в природе	348
10.2.2. Производство и применение простых веществ	348
10.2.3. Атомные и физические свойства	350
10.2.4. Химические свойства	352
10.3. Соединения	353
10.3.1. Гидриды и гидрогалогениды	353
10.3.2. Галогениды и родственные комплексы	354
Галогениды германия	355
Галогениды олова	356
Галогениды свинца	359
10.3.3. Оксиды и гидроксиды	360
10.3.4. Производные оксокислот	363
10.3.5. Другие неорганические соединения	366
10.3.6. Связи металл–металл, кластеры	368
10.3.7. Металлоорганические соединения	371
Германий	371
Олово	374
Свинец	377
Литература	379
ГЛАВА 11. АЗОТ	382
11.1. Введение	382
11.2. Элемент	383
11.2.1. Распространенность и нахождение в природе	383
11.2.2. Производство и использование азота	386
11.2.3. Атомные и физические свойства	387
11.2.4. Химические свойства	387
11.3. Соединения	391
11.3.1. Нитриды, азиды и нитридокомплексы	391

11.3.2. Аммиак и соли аммония	394
Жидкий аммиак как растворитель	397
11.3.3. Другие гидриды азота	399
Гидразин	400
Гидроксиламин	403
Азид водорода	405
11.3.4. Термодинамические соотношения между N-содержащими частицами	406
11.3.5. Галогениды азота и родственные соединения	410
11.3.6. Оксиды азота	414
Закись азота (монооксид диазота) N_2O	414
Оксид азота (монооксид азота) NO	416
Триоксид диазота N_2O_3	423
Диоксид азота NO_2 и тетраоксид диазота N_2O_4	424
Пентаоксид диазота N_2O_5 и триоксид азота NO_3	427
11.3.7. Оксокислоты, оксоанионы и соли оксокислот азота	428
Азотноватистая кислота и гипонитриты	428
Азотистая кислота и нитриты	430
Азотная кислота и нитраты	433
Ортонитраты $M_3^I NO_4$	439
Литература	440
ГЛАВА 12. ФОСФОР	444
12.1. Введение	444
12.2. Элемент	446
12.2.1. Распространенность и нахождение в природе	446
12.2.2. Производство и применение фосфора в виде простого вещества	449
12.2.3. Аллотропные формы фосфора	449
12.2.4. Атомные и физические свойства	452
12.2.5. Химические свойства и стереохимия	453
12.3. Соединения фосфора	457
12.3.1. Фосфи́ды	457
12.3.2. Фосфин и его производные	460
12.3.3. Галогениды фосфора	462
Тригалогениды фосфора	463
Тетрагалогениды дифосфора и другие низшие галогениды фосфора	465
Пентагалогениды фосфора	465
Псевдогалогениды фосфора(III)	468
12.3.4. Оксогалогениды и тиогалогениды фосфора	468
12.3.5. Оксиды, сульфиды, селениды фосфора и их производные	469
Оксиды	470
Сульфиды	472
Оксосульфиды	475
12.3.6. Оксокислоты фосфора и их соли	475
Гипофосфористая кислота и гипофосфиты $[H_2PO(OH) \text{ и } H_2PO^{2-}]$	478
Фосфористая кислота и фосфиты $[HPO(OH)_2 \text{ и } HPO_3^{2-}]$	479
Гипофосфорная кислота ($H_4P_2O_6$) и гипофосфаты	480
Другие низшие оксокислоты фосфора	481
Фосфорные кислоты	481
Ортофосфаты	487
Цепочечные полифосфаты	490
цикло-Полифосфорные кислоты и цикло-полифосфаты	493
12.3.7. Соединения со связями фосфор–азот	494
Циклофосфазаны	496
Фосфазены	496
Полифосфазены	498
12.3.8. Фосфорорганические соединения	504
Литература	507

ГЛАВА 13. МЫШЬЯК, СУРЬМА, ВИСМУТ	511
13.1. Введение	511
13.2. Элементы	512
13.2.1. Распространенность, нахождение в природе и получение	512
13.2.2. Атомные и физические свойства	514
13.2.3. Химические свойства и общие групповые закономерности	516
13.3. Соединения мышьяка, сурьмы и висмута	518
13.3.1. Интерметаллические соединения и сплавы	518
13.3.2. Гидриды мышьяка, сурьмы и висмута	519
13.3.3. Галогениды и их производные	521
Тригалогениды MX_3	522
Пентагалогениды MX_5	524
Смешанные и низшие галогениды	525
Галогенидные комплексы M^{III} и M^{V}	527
Оксогоалогениды	531
13.3.4. Оксиды и оксосоединения	533
Оксосоединения M^{III}	533
Оксиды со смешанной валентностью элемента	536
Оксосоединения M^{V}	537
13.3.5. Сульфиды и родственные соединения	539
13.3.6. Связи металл–металл и кластеры	542
13.3.7. Другие неорганические соединения	549
13.3.8. Металлоорганические соединения	550
Органические производные As^{III}	550
Органические производные As^{V}	551
Физиологическое действие мышьяксодержащих соединений	552
Сурьмаорганические и висмуторганические соединения	554
Литература	556
ГЛАВА 14. КИСЛОРОД	560
14.1. Элемент	560
14.1.1. Введение	560
14.1.2. Распространение в природе	561
14.1.3. Получение	562
14.1.4. Атомные и физические свойства	563
14.1.5. Другие формы кислорода	566
Озон	566
Атомарный кислород	570
14.1.6. Химические свойства дикислорода O_2	570
14.2. Соединения кислорода	573
14.2.1. Координационная химия: кислород в роли лиганда	573
14.2.2. Вода	577
Введение	577
Распространение воды в природе и ее запасы	578
Физические свойства и строение	579
Кристаллизационная вода, аквакомплексы и твердые гидраты	581
Химические свойства	583
Поливода	588
14.2.3. Пероксид водорода	588
Физические свойства	588
Химические свойства	589
14.2.4. Фториды кислорода	592
14.2.5. Оксиды	594
Различные варианты классификации	594
Нестехиометрия	596
Литература	598

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Многие даже хорошие учебники по общей и неорганической химии очень похожи друг на друга, так как оперируют одним и тем же набором теоретических представлений и экспериментальных фактов, значительная часть которых вошла в научный обиход много десятилетий или даже одно-два столетия тому назад. Предлагаемая вниманию российского читателя книга Н. Гринвуда и А. Эрншо не похожа ни на один из таких учебников. Отдавая должное исторически важным ранним этапам развития химии, авторы не просто доводят изложение предмета вплоть до сегодняшнего дня (вернее, почти до дня сдачи в печать второго издания своей книги), но уделяют открытиям и интересным экспериментам последнего времени особенно много внимания. Стремясь освободиться от сложившихся стереотипов, создающих впечатление статичности науки, и представить химию в ее развитии, авторы даже в названии книги открыто отказались от традиционного термина «неорганическая химия», полагая его устаревшим, и заменили его «химией элементов». Если вспомнить известную шутку о том, что неорганическая химия — это то, чем занимаются химики-неорганики, этот терминологический радикализм не покажется столь уж неуместным, тем более что занимаются они, как правило, именно химией элементов.

При создании своего труда авторы, помимо идеи непрерывного развития химии как науки и постоянной опоры на Периодическую систему элементов Д.И. Менделеева, руководствовались несколькими четко обозначенными в их предисловиях принципами. В кратком изложении они выглядят так:

— вынесение на первый план фактических сторон излагаемого предмета, а не покоящихся на этих основаниях теоретических концепций (впрочем,

утверждение авторов об «эфемерности» любых теорий представляется излишне категоричным);

— сбалансированное включение в изложение химии элементов всех связанных с ней разделов из других областей химии (физической, аналитической, элементоорганической, химической технологии и т.п.) и даже глобальных проблем развития общества (так, в главе о водороде достаточно детально обсуждаются перспективы водородной энергетики);

— ориентация на разных читателей: на тех, кого больше привлекают логика и красота науки, и на тех, кто в первую очередь интересуется многообразными приложениями химии в современном мире. Здесь стоит отметить не имеющее прецедента обращение авторов в сотни химических фирм и включение полученной от них информации в текст соответствующих глав, что придает изложению особую привлекательность, хотя порой и лишено легкого привкуса рекламы.

Читатель без труда обнаружит и те методические принципы, которыми руководствовались авторы, и скорее всего не сможет не согласиться с ними. Наиболее ценная методическая особенность книги — все реже встречающаяся теперь, но в полной мере присущая авторам почти по-юношески романтическая увлеченность химией (сами авторы предпочитают говорить об испытываемом ими волнении и очаровании), которая определяет весь стиль изложения и быстро «заражает» читающего. Естественно, что удовольствие, испытываемое при чтении книги всяким мало-мальски подготовленным читателем, положительно сказывается на эффективности усвоения материала.

Книга Гринвуда и Эрншо давно переведена на многие языки. Русское издание, конечно, запоздало. Однако в определенном смысле оно выходит как нельзя более своевременно — в момент

перехода российской высшей школы на двухуровневую систему бакалавр-магистр (или специалист). Большая часть переводчиков этой книги — преподаватели кафедры неорганической химии Московской государственной академии тонкой химической технологии (МИТХТ), которая одной из первых в России перешла на двухуровневую систему.

Приступая к переводу книги, издательство и коллектив переводчиков исходили из того, что она может служить почти идеальным учебным и справочным пособием для обучающихся в магистратуре и аспирантуре химических факультетов университетов и химических вузов. Книга содержит 31 главу; по сути каждая из них представляет собой исчерпывающую обзорную статью. Все они объединены общей идеей и снабжены в общей сложности несколькими тысячами ссылок на монографии, обзоры и оригинальные статьи. Это предоставляет студенту, аспиранту и преподавателю самые широкие и разнообразные возможности работы над материалом — от создания небольшого курса лекций, охватывающего по усмотрению преподавателя содержание всего нескольких глав, до составления обстоятельных обзоров литературы и курсовых работ с использованием приведенной в книге библиографии. Книга является прекрасной стартовой площадкой для перехода от

изучения химии к самостоятельной творческой работе в науке.

Разумеется, круг возможных читателей этого учебника не ограничивается будущими магистрами, аспирантами и преподавателями высшей школы. Чтение учебника не предполагает очень серьезной предварительной физико-химической подготовки, поэтому отдельные главы с интересом и большой пользой для себя прочтут продвинутый школьник, хорошо успевающий студент-химик младших курсов, не чувствующий себя вполне удовлетворенным предлагаемым ему обязательным учебным материалом школьный преподаватель. Много интересного найдет в книге молодой (да и не только молодой!) ученый. По названным причинам книга будет выглядеть вполне уместно в фондах почти любой библиотеки — от школьной и районной до библиотеки академического института.

Перевод выполнен В.А. Михайловым (предисловия, гл. 1–3, 31), Е.В. Савинкиной (гл. 4–7, 28, 29, приложения), Ю.И. Азимовой (гл. 8), Е.Э. Григорьевой (гл. 9, 10), Н.М. Логачевой (гл. 11–13), Л.Ю. Аликберовой (гл. 14–18), Н.С. Рукк (гл. 19–22, 30), М.Ф. Рукк (гл. 23–25), С.М. Пестовым (гл. 26, 27).

В.А. Михайлов

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Появившись впервые в 1984 г., эта книга быстро зарекомендовала себя как один из лучших учебников и полезный справочник. Она была одобрена и студентами, и преподавателями и уже переведена на несколько языков в Европе и Азии. Было ясно, что новые подходы, положенные в ее основу (см. предисловие к первому изданию), высоко оцениваются научной и педагогической общественностью, и нам неоднократно и настойчиво предлагали выпустить второе издание книги. В соответствии с этими пожеланиями мы полностью пересмотрели и сделали более современным текст и добавили более 2000 новых ссылок на работы, появившиеся после выхода в свет первого издания. В связи с последними достижениями химии элементов в текст внесены бесчисленные изменения и дополнения, затронувшие фактически каждую страницу. В то же время при тщательном редактировании книги мы постарались сохранить все ее особенности, сделавшие первое издание столь привлекательным для читателей.

Основной план книги остался неизменным, лишь раздел о химии металлоорганических соединений был изъят из главы 8 («Углерод») и включен вместе с кратким изложением других аспектов координационной химии в переработанную главу 19. Однако химия даже самых простых с точки зрения химика элементов за последние годы существенно обогатилась, а иногда даже претерпела драматические изменения. Так, современную сложную химию щелочных металлов нельзя было даже представить десять или двадцать лет тому назад; например, для лития в настоящее время известно по меньшей мере 20 способов координации с координационными числами от 1 до 12. Известны соединения с *анионами* щелочных металлов и даже электриды. Аналогичным образом в химии металлоорганических соединений все боль-

ший интерес вызывают тяжелые элементы группы магния, особенно их соединения с крупными лигандами. Продолжает удивлять химиков бор, химия кластеров на его основе постоянно развивается и расширяется, так же как химия соединений, содержащих связь сера–азот, химия гетерополикислот, бионеорганическая химия многих элементов, химия соединений лантанидов в низких степенях окисления и т.д. Подобное утверждение верно для материала практически всех остальных глав вплоть до синтеза и определения свойств самого тяжелого из трансактинидных элементов с $Z = 112$. Здесь уместно напомнить, что в настоящее время известно на 49 элементов больше, чем знал Менделеев (63 элемента), когда создавал свою периодическую систему элементов.

О быстром прогрессе химии элементов за последние 15 лет свидетельствуют также несколько совершенно новых разделов, посвященных не существовавшим ранее совершенно неожиданным областям химии. К ним относятся а) координационные соединения дигапто-диводорода, б) фуллерены и их многочисленные производные, в) меткары и г) высокотемпературные оксидные сверхпроводники.

Мы надеемся, что новое издание «Химии элементов» окажется столь же полезным для его читателей, как и предыдущее, и они испытают то же волнение и очарование, которые вызывает у нас эта развивающаяся на наших глазах область науки. Мы должны также поблагодарить наших многочисленных корреспондентов, сообщавших нам о своих работах, и Школу химии университета города Лидс, создавшую нам благоприятные условия для работы над книгой.

*Н.Н. Гринвуд
А. Эрншо
Август, 1997*

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

В этой книге мы попытались дать сбалансированный, последовательный и исчерпывающий обзор химии элементов для студентов и аспирантов. Рассматриваемая центральная область химии изобилует остроумными экспериментами, интригующими соединениями и волнующими новыми открытиями. Мы намеренно избегали термина «неорганическая химия», так как он выражает устаревший взгляд на химию, уже не соответствующий последним десятилетиям XX века. В соответствии с этим в химии элементов мы имеем дело не только с неорганической химией, но и с аналитической, теоретической, промышленной, металлургической или бионеорганической химией, а также с любыми другими из существующих ныне многочисленных областей химии.

Мы сознательно уделяем основное внимание химическим явлениям и фактическим основаниям предмета. Разумеется, химия элементов обсуждается в рамках принятых теоретических концепций, что придает тексту цельность и последовательность. Но при этом всегда на первый план выносятся то, что может быть названо «химической химией». Для этого есть несколько причин. Прежде всего, теории изменяются, а с фактами это происходит реже, поэтому более долговечны и полезны подходы, основанные на знании и понимании фактических оснований предмета. Мы признаем, конечно, что хотя сами факты не могут изменяться принципиально, их значение часто сильно меняется. Поэтому важно научить читателя правильно оценивать наблюдения и анализировать информацию, этому служат многочисленные примеры в тексте. Кроме того, методически неправильно сначала излагать научную теорию, а затем описывать эксперименты, которые должны ее подтвердить. Важно различать факты и теории и понимать, что теории по своей природе эфемерны и постоянно

изменяются. Наука продвигается вперед путем устранения ошибок, а не установления истин, и никакое количество экспериментов не может «подтвердить» теорию, можно лишь констатировать, что теория согласуется с уже известными фактами. (При более тщательном анализе мы убеждаемся также, что все факты уже отягощены теорией.)

Важно также осознать, что химия не представляет собой некий неизменный объем знаний, определяемый содержанием учебника. Химия возникла когда-то в прошлом и развивается в настоящее время в многочисленных направлениях. Это живая саморазвивающаяся дисциплина, и мы пытались передать это ощущение постоянного роста, обращаясь к истории предмета всякий раз, когда это было уместно. Химия элементов представлена логически и методически обоснованно, но изложение перемежается дополнительным материалом, который иллюстрирует, насыщает примерами, расширяет или иным образом обогащает обсуждаемый раздел химии.

Химия — это область человеческой деятельности, и ее достижения оказывают существенное влияние на нашу повседневную жизнь. Однако мы не позволяли себе увлечься сиюминутной «полезностью», ибо сегодняшнее полезное — это завтрашнее устарелое. В то же время в современном мире неразумно не признавать, что химия не только теоретически и эстетически привлекательна, но часто просто полезна. Это придает дополнительный интерес многим разделам химии элементов, которые, конечно же, во многом развиваются именно благодаря потребностям общества. Для многих людей именно потенциальная польза представляет наиболее привлекательный аспект предмета. Поэтому мы запросили у более чем 500 химических фирм во всем мире сведения о производимых или используемых ими химикатах, их коли-

чествах и назначении. Полученная обширная техническая информация оказалась бесценным источником данных при изложении химии элементов. Поскольку собственный педагогический опыт убедил нас в том, что студенты с трудом овладевают подобной информацией, мы распределили большую часть этого материала по всему тексту. Мы полагаем, что важно знать, получено ли данное соединение в количестве нескольких миллиграммов и, возможно, лишь один раз или же оно ежегодно производится в количестве многих тонн; кроме того, нужно знать и для каких целей оно производится.

Учебник, посвященный химии элементов, логично начать с вопросов: откуда произошли химические элементы? как они возникли? чем объясняется их наблюдаемая распространенность на Земле? что определяет их атомные массы? и т.п. Эти вопросы, хотя они обычно игнорируются в учебниках и трудны для ответа, являются в настоящее время предметом активных исследований. В первой главе нашей книги мы рассказываем, как современная наука пытается ответить на подобные вопросы. Далее следует краткое описание химической периодичности и периодической систе-

мы, и лишь после этого мы переходим к систематическому обсуждению химии отдельных элементов и взаимоотношений между элементами в группах.

Большую поддержку мы ощущали благодаря замечаниям и комментариям по отдельным главам, которые получали от многих коллег не только в Соединенном Королевстве, но и из Австралии, Канады, Дании, ФРГ, Японии, США и других стран. Мы полагаем, что предложенный нами новый подход большинством коллег будет воспринят с одобрением как основа для обсуждения чрезвычайно разнообразного поведения химических элементов и их соединений.

С огромным удовольствием мы выражаем благодарность персоналу библиотеки им. Эдварда Бойля в университете Лидса, который оказывал авторам неизменную помощь в течение многих лет работы над этой книгой. Нам хотелось бы также поблагодарить миссис Джейн Томас за ее настойчивость и выдающееся мастерство при подготовке рукописи к изданию. Без ее постоянной помощи и понимания со стороны наших семей мы не смогли бы завершить эту работу.

*Н.Н. Гринвуд
А. Эрншо*

		1 H		2 He													
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub						
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

1 Происхождение элементов. Изотопы и атомные массы

1.1. Введение

Эта книга посвящена химии элементов. В настоящее время известно 112 элементов, хотя не все из них встречаются в природе. Из 92 элементов от водорода до урана все, за исключением технеция и прометия, найдены на Земле, технеций обнаружен на некоторых звездах. Еще 20 элементов были добавлены искусственным ядерным синтезом в лабораториях. Почему в природе существуют только 90 элементов? Чем обусловлены наблюдаемые распространенности элементов и относительные содержания каждого изотопа в природной смеси? Конечно, мы должны также ответить на вопрос, в какой степени изотопный состав элементов подвержен изменениям в природе, имея в виду, что его изменения ведут к непостоянству атомных масс и, возможно, даже ставят под сомнение классические способы определения химического состава и строения веществ посредством химического анализа.

Теорий много, и всегда важно четко различать экспериментальные данные, модели, полезные для планирования последующих экспериментов, и принятые в данное время теории, цель которых — интерпретация известных фактов. «Пробная», т.е. неокончателная природа нашего знания, вероятно, нигде не проявляется с большей очевидностью, чем в вопросах о происхождении химических элементов и их современном изотопном составе, которые рассматриваются в нескольких первых разделах этой главы. Это и неудивительно, так как прогресс в этой огромной области знания стал возможен лишь в последние десятилетия благодаря новым открытиям в ядерной физике, астрофизике, теории относительности и квантовой теории.

1.2. Происхождение Вселенной

В настоящее время большинство ученых объясняют происхождение и эволюцию Вселенной к ее современному виду теорией Большого Взрыва [1]. Эта теория предполагает, что вся материя Вселенной некогда была сосредоточена в первичном ядре с огромными плотностью ($\sim 10^{96} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$) и температурой ($\sim 10^{32} \text{ K}$), которое по некоторым причинам взорвалось и распространило излучение и материю по всему пространству. По мере расширения Вселенная охлаждалась; это позволило постепенно дифференцироваться четырем основным типам взаимодействия и привело к образованию частиц различных типов. Наука ничего не может сказать об условиях, существовавших до достижения времени Планка $t_p [(Gh/c^5)^{1/2} = 1,33 \cdot 10^{-43} \text{ с}]$, когда гравитационные и электромагнитные, а также сильные и слабые ядерные взаимодействия были недифференцированы и равносильны. Через 10^{-43} с после Большого Взрыва ($T = 10^{31} \text{ K}$) гравитация выделилась как отдельная сила, а через 10^{-35} с (10^{28} K) сильные ядерные взаимодействия отделились от все еще неразделенных сил электромагнитного и слабого ядерного взаимодействия. Речь здесь идет о невообразимо малых временах и высоких температурах: так, например, фотону, движущемуся со скоростью света, нужно 10^{-24} с , чтобы преодолеть расстояние, равное диаметру атомного ядра. Через 10^{-10} с после Большого Взрыва температура, согласно расчетам, понизилась до 10^{15} K , что позволило дифференцироваться электромагнитным и слабым взаимодействиям. К моменту $6 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ($1,4 \cdot 10^{12} \text{ K}$) из кварков образовались протоны и нейтроны, затем стабилизировались электроны. Через одну секунду от момента Взрыва, после периода аннигиляции

частиц и античастиц и образования электромагнитных фотонов Вселенная уже была населена частицами, названия которых хорошо знакомы всем химикам — протонами, нейтронами и электронами.

Вскоре после этого сильные ядерные взаимодействия вызвали соединение большого числа протонов и нейтронов в ядра дейтерия ($p + n$), а затем и гелия ($2p + 2n$). Так начался процесс возникновения элементов. В течение этого маленького отрезка космической истории, приходящегося на 10–500 с после Взрыва, вся Вселенная представляла собой как бы огромный гомогенный термоядерный реактор, превращающий водород в гелий. До этого ядра гелия не могли существовать — температура была настолько высокой, что мощное излучение немедленно превратило бы их снова в протоны и нейтроны. В дальнейшем вследствие продолжающегося расширения Вселенной плотность частиц стала слишком низкой для реализации этих хотя и сильных, но короткодействующих взаимодействий. Вычисления, таким образом, показывают, что в течение примерно 8 минут около четверти массы Вселенной превратилось в ядра гелия, а около трех четвертей осталось в виде водорода. Одновременно около $10^{-3}\%$ ее массы превратилось в ядра дейтерия и около $10^{-6}\%$ — в ядра лития. Эти выводы космологической теории Большого Взрыва подтверждаются экспериментальными наблюдениями. Повсюду во Вселенной — и в самых старых звездах нашей Галактики, и в молодых звездах удаленных от нас галактик — распространенность гелия близка к 25%. Еще более удивительно, что предсказанная концентрация дейтерия была обнаружена в межзвездных облаках. Кроме того, как станет понятно далее, на звездах ядра дейтерия разрушаются сразу же после их образования, и вблизи них не создается заметной равновесной концентрации ядер дейтерия из-за высокой температуры звездного окружения. Единственным источником дейтерия во Вселенной предстает, таким образом, Большой Взрыв. Никакая другая космологическая теория не может в настоящее время объяснить наблюдаемое соотношение $H : He : D$.

Две другие характеристики Вселенной также легко объясняются теорией Большого Взрыва. Во-первых, как было обнаружено Э. Хабблом в 1929 г., свет, получаемый Землей от далеких галактик, всегда тем более смещен к красному концу спектра, чем больше расстояние до его источника. Это означает, что Вселенная все еще расширяется, и обратная экстраполяция во времени после некоторых допущений показывает, что Большой Взрыв произошел около 15 млрд лет тому

назад. Независимые оценки возраста Вселенной, выполненные другими способами, неизменно приводят к близкому результату. Во-вторых, теория убедительно объясняет (скорее даже предсказывает) существование всемирного изотропного космического излучения со спектром черного тела. Это излучение (соответствующее по последним измерениям температуре $2,735 \pm 0,06$ К) было открыто в 1965 г. А. Пензиасом и Р. Вильсоном [2] и рассматривается как затухающий реликт Большого Взрыва. Ни одна из других предложенных к настоящему времени космологических теорий не может объяснить все эти разнообразные наблюдения.

1.3. Распространенность элементов во Вселенной

Информация о распространенности по крайней мере некоторых элементов на Солнце, звездах, в газовых туманностях и в межзвездном пространстве была получена при детальном спектроскопическом анализе в различных диапазонах электромагнитного спектра. Эти данные дополняются прямым анализом образцов земных пород и метеоритов, а в последние годы все в большей степени и образцов вещества комет, лунных пород и проб, взятых с поверхности других планет Солнечной системы и их спутников. Результаты свидетельствуют о сильной дифференциации вещества в Солнечной системе и некоторых звездах, но картина в целом удивляет однородностью состава. Водород — наиболее распространенный элемент во Вселенной, на его долю приходится 88,6% всех атомов (или ядер). Гелия примерно в 8 раз меньше (11,3%), и на эти два элемента вместе приходится 99,9% всех атомов и около 99% массы Вселенной. Ядерный синтез более тяжелых элементов из водорода и гелия прошел, таким образом, в малой степени.

Имеются различные оценки распространенности элементов во Вселенной, и хотя они иногда различаются в деталях для отдельных элементов, эти расхождения редко превышают коэффициент 3 ($10^{0,5}$) на шкале, охватывающей 12 порядков. Соответствующие данные представлены на рис. 1.1. На нем хорошо видны некоторые особенности, которые должны быть объяснены любой удовлетворительной теорией происхождения элементов. К этим особенностям относятся, например, следующие:

- 1) распространенность элементов с ростом атомного массового числа A уменьшается экспоненциально до $A \approx 100$ (т.е. $Z \approx 42$);

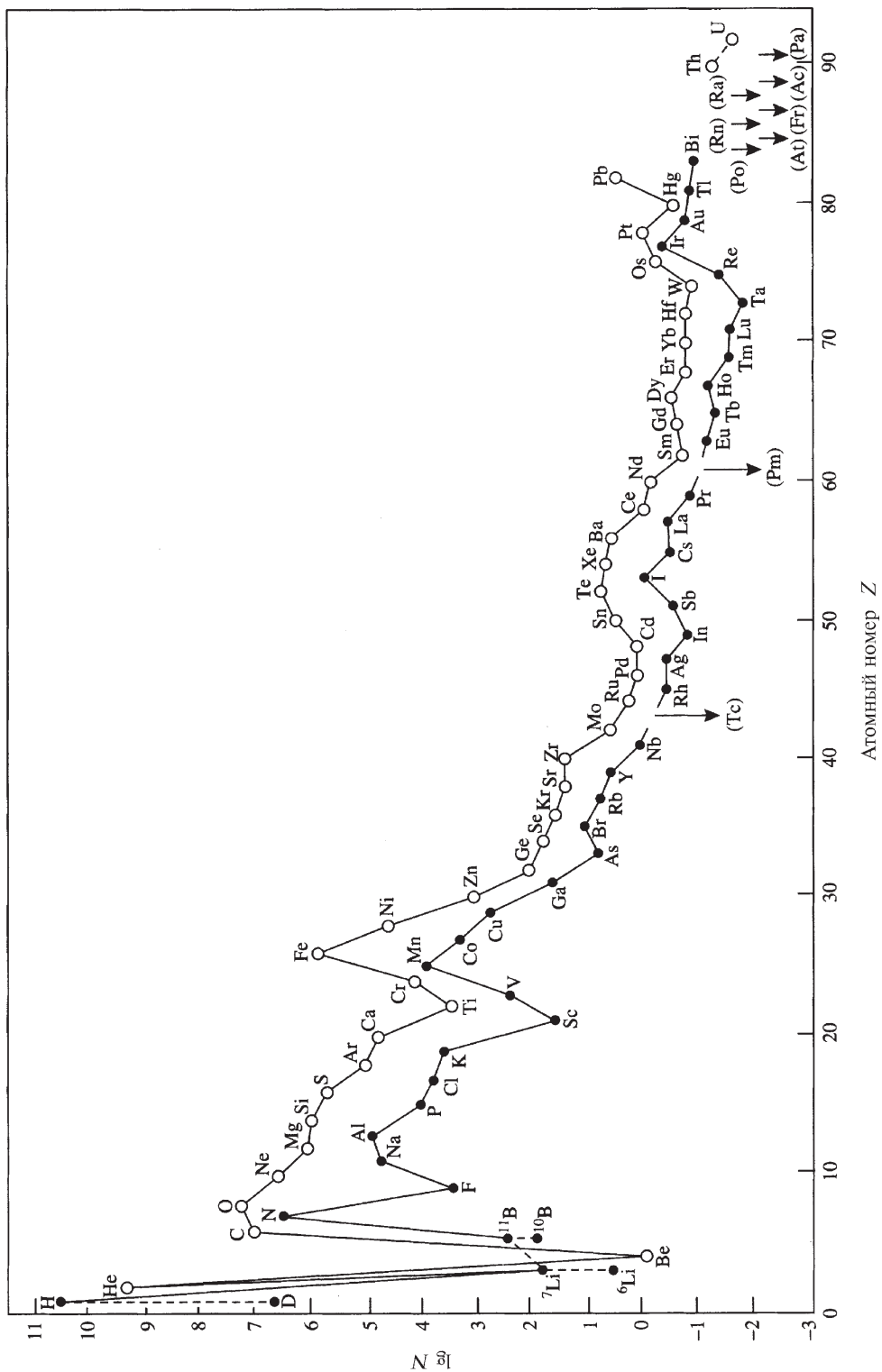


Рис. 1.1. Распространенность элементов во Вселенной как функция атомного номера Z . Распространенность выражена как число атомов на 10^6 атомов Si и отложена в логарифмической шкале [A.G.W. Cameron, Space Sci. Rev., 15, 121–146 (1973)], учтены также некоторые более новые данные)

- после этого уменьшение замедляется и временами маскируется локальными флуктуациями;
- 2) в интервале Z от 23 до 28 присутствует явно выраженный пик, охватывающий V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni; максимум этого пика приходится на Fe, распространенность которого примерно в 10^3 раз превышает значение, ожидаемое из общего хода кривой;
 - 3) дейтерий (D), Li, Be и B — более редкие элементы по сравнению с соседними H, He, C и N;
 - 4) среди более легких ядер (вплоть до Sc, $Z=21$) те из них, массы которых кратны 4, более распространены по сравнению с их соседями, например ^{16}O , ^{20}Ne , ^{24}Mg , ^{28}Si , ^{32}S , ^{36}Ar и ^{40}Ca (правило Г. Оддо, 1914);
 - 5) атомы с четными A более распространены по сравнению с атомами с нечетными A (на рис. 1.1 это проявляется в виде смещения вверх кривой для четных Z , исключением является лишь бериллий с устойчивым изотопом ^9_4Be и несуществующим ^8_4Be).

Еще две особенности становятся заметными, если рассмотреть график зависимости распространенности элементов от A , а не от Z :

- 6) атомы тяжелых элементов, как правило, обогащены нейтронами, тяжелые обогащенные протонами нуклиды редки;
- 7) двойные максимумы распространенности наблюдаются при $A=80, 90$; $A=130, 138$; $A=196, 208$ (см. рис. 1.5, с. 19).

Необходимо также объяснить существование в природе естественных радиоактивных элементов, периоды полураспада которых (или периоды полураспада их предшественников) существенно меньше, чем предполагаемый возраст Вселенной.

В результате широких исследований, выполненных в течение последних 40 лет, стало возможным дать детальное и убедительное объяснение изложенных выше экспериментальных данных. Историческая последовательность достижений, приведших к современному уровню понимания проблемы происхождения элементов, коротко представлена в дополнении 1.1. Поскольку эта проблема тесно

Дополнение 1.1. Происхождение элементов — исторические вехи

1890-е гг.	Первые систематические исследования распространенности элементов на Земле	Ф. Кларк, Г. Вашингтон и др.
1905	Специальная теория относительности: $E = mc^2$	А. Эйнштейн
1911	Ядерная модель атома	Э. Резерфорд
1913	Открытие изотопов у стабильного элемента (Ne)	Дж. Томсон
1919	Первая ядерная реакция $^{14}_7\text{N}(\alpha, p)^{17}_8\text{O}$	Э. Резерфорд
1925–1928	Первые спектроскопические данные о распространенности элементов на звездах	С. Пэйн; Г. Ресселл
1929	Первая публикация о звездном нуклеосинтезе при слиянии протонов с образованием гелия и более тяжелых нуклидов	Р. Аткинсон и Ф. Хутерменс
1937	«Отсутствующий» элемент с $Z=43$ (технеций) синтезирован по реакции $^{99}_{42}\text{Mo}(d, n)^{99}_{43}\text{Tc}$	К. Перье и Э. Сегре
1938	Двумя учеными независимо предложен каталитический CNO-процесс, облегчающий ядерный синтез в звездах	Х. Бете, К. фон Вайцзеккер
1938	Открыт процесс деления урана	О. Хан и Ф. Штрассман
1940	Синтез первого трансуранового элемента $^{239}_{93}\text{Np}$	Э. Макмиллан и Ф. Эйблсон
1947	Среди продуктов деления урана открыт последний «отсутствующий» элемент с $Z=61$ (Pm)	Дж. Маринский, Л. Глендин и Ч. Кориелл
1948	В теорию расширяющейся после Большого Взрыва Вселенной включена теория (неверная) нуклеогенезиса	Р. Альфер, Х. Бете и Г. Гамов
1952–1954	Нуклеогенезис дополнен процессом горения гелия	Э. Салпетер, Ф. Хойл
1954	Перечень протекающих в звездах реакций дополнен медленным поглощением нейтронов	А. Камерон
1955–1957	Создана исчерпывающая теория звездного синтеза всех элементов и их космической распространенности	Э. Бербидж, Дж. Бербидж, У. Фаулер, Ф. Хойл
1965	Открыто реликтовое излучение 2,7 К	А. Пензиас и Р. Вильсон

связана с теориями эволюции звезд, в следующем разделе коротко описаны различные типы звезд, а затем мы перейдем к обсуждению различных процессов синтеза химических элементов.

1.4. Эволюция звезд и их спектральные классы [3, 4]

В общих чертах эволюцию звезд можно представить следующим образом. Первая стадия — формирование звезды за счет аккреции, т.е. обусловленного силами гравитации падения вещества исходного холодного водородно-гелиевого облака на первоначально образовавшееся в нем ядро. Для звезды с размерами и средней плотностью Солнца (масса $1,991 \cdot 10^{30}$ кг = $1M_{\odot}$) данная стадия может занять около 20 лет. Это гравитационное сжатие сопровождается выделением тепла, часть которого теряется в виде излучения, однако продолжающееся сжатие приводит к росту температуры, до тех пор пока в центральной части звезды (ядре) при $\sim 10^7$ К не начинаются ядерные реакции. Энергия этих реакций компенсирует радиационные потери, вследствие чего устанавливается состояние временного равновесия или стационарное состояние.

Когда $\sim 10\%$ водорода в ядре звезды уже истрачено на ядерные реакции, возобновляется процесс гравитационного сжатия и роста температуры. При $\sim 2 \cdot 10^8$ К начинается выгорание гелия за счет реакций ядерного слияния. Далее следует истощение запаса гелия и сжатие с ростом температуры до $\sim 10^9$ К, когда становятся возможными ядерные реакции с участием более тяжелых ядер ($Z=8-22$). Продолжительность этих процессов сильно зависит от массы звезды. Она может составить 10^{12} лет для звезды с массой $0,2 M_{\odot}$, 10^{10} лет для одной солнечной массы, 10^7 лет для массы $10 M_{\odot}$ и всего $8 \cdot 10^4$ лет для звезды с массой $50 M_{\odot}$, т.е. чем массивнее звезда, тем быстрее она расходует свое ядерное топливо. Дальнейшие катастрофические изменения приводят к выбросу значительной части звездного вещества в окружающее пространство, где оно вместе с водородом и гелием вовлекается в формирование следующего поколения звезд. Следует, однако, заметить, что, поскольку максимум кривой энергии связи в ядре приходится на железо, в экзотермических процессах рассмотренного типа, протекающих самопроизвольно при достаточном повышении температуры, возникают только элементы легче железа

($Z=26$). Для образования элементов тяжелее железа требуется уже подвод энергии.

Доказательства, на которых основывается обсуждаемая теория эволюции звезд, почерпнуты не только из совокупности известных ядерных реакций и релятивистского принципа эквивалентности массы и энергии. Важнейшее значение имеет спектроскопическое изучение света, поступающего к нам от звезд. Спектральная классификация звезд — это краеугольный камень современной экспериментальной астрофизики. Спектроскопический анализ звездного света дает ценную информацию о химическом составе звезд, позволяя не только идентифицировать присутствующие там элементы, но и оценить их относительные концентрации. Кроме того, обусловленное эффектом Доплера «красное смещение» спектральных линий может быть использовано для оценки относительных движений звезд и их удаленности от Земли. Более тонкие измерения позволяют определить температуру поверхности звезд по спектральным характеристикам их теплового излучения: чем выше температура, тем короче длина волны в максимуме эмиссии. Поэтому более холодные звезды кажутся нам красными, а более горячие звезды по мере роста температуры — соответственно желтыми, белыми и голубыми. Различия в цвете звезд, как показано в табл. 1.1, связаны также с различиями в их химическом составе.

Если спектральные классы звезд (или их температуры) отложить в зависимости от звездной величины (или светимости), на диаграмме выявится несколько предпочтительных областей, в которые попадает большинство звезд. Такие диаграммы были впервые построены независимо друг от друга Э. Герцшпрунгом в 1905–1907 гг. и Г. Ресселлом в 1913 г. и теперь называются диаграммами Герцшпрунга–Ресселла (рис. 1.2). Более 90% всех звезд располагаются вдоль широкой полосы, называемой главной последовательностью. Она охватывает все спектральные классы и весь интервал изменения звездных величин от больших и горячих звезд класса О с большой массой в верхней части диаграммы до маленьких плотных, красноватых звезд класса М в ее нижней части. Определения «большой» и «маленький» имеют здесь лишь относительное значение, так как все звезды вдоль главной последовательности классифицируются как карлики.

Следующая наиболее многочисленная группа звезд расположена выше и правее главной последовательности. Звезды этой группы называются красными гигантами. Например, Капелла и

Таблица 1.1. Спектральные классы звезд

Класс ^{a)}	Цвет	Температура поверхности, К	Спектральная характеристика	Примеры
O	Голубой	> 25 000	Линии ионизированного He и других элементов; слабые линии H	10 в созвездии Ящерицы
B	Голубовато-белый	11 000–25 000	Преобладают H и He	Ригель, Спика,
A	Белый	7500–11 000	Очень сильные линии H	Сириус, Вега
F	Желтовато-белый	6000–7000	Линии H слабые; становятся хорошо заметными линии ионизированных металлов	Канопус, Прокцион
G	Желтый	5000–6000	Преобладают линии ионизированных и нейтральных металлов (особенно Ca)	Солнце, Капелла
K	Оранжевый	3500–5000	Линии нейтральных металлов и полосатые спектры простых радикалов (например, CN, OH, CH)	Арктур, Альдебаран
M	Красный	2000–3500	Преобладают полосатые спектры простых молекул (например, TiO)	Бетельгейзе, Антарес

^{a)} Существует дальнейшее деление каждого класса на 10 подклассов, например ...F8, F9, G0, G1, G2,... Солнце (температура поверхности 5780 К) относится к подклассу G2. Последовательность букв, обозначающих классы звезд, сложилась исторически и, возможно, ее легче всего запомнить с помощью мнемонической фразы «Oh Be A Fine Girl (Guy), Kiss Me».

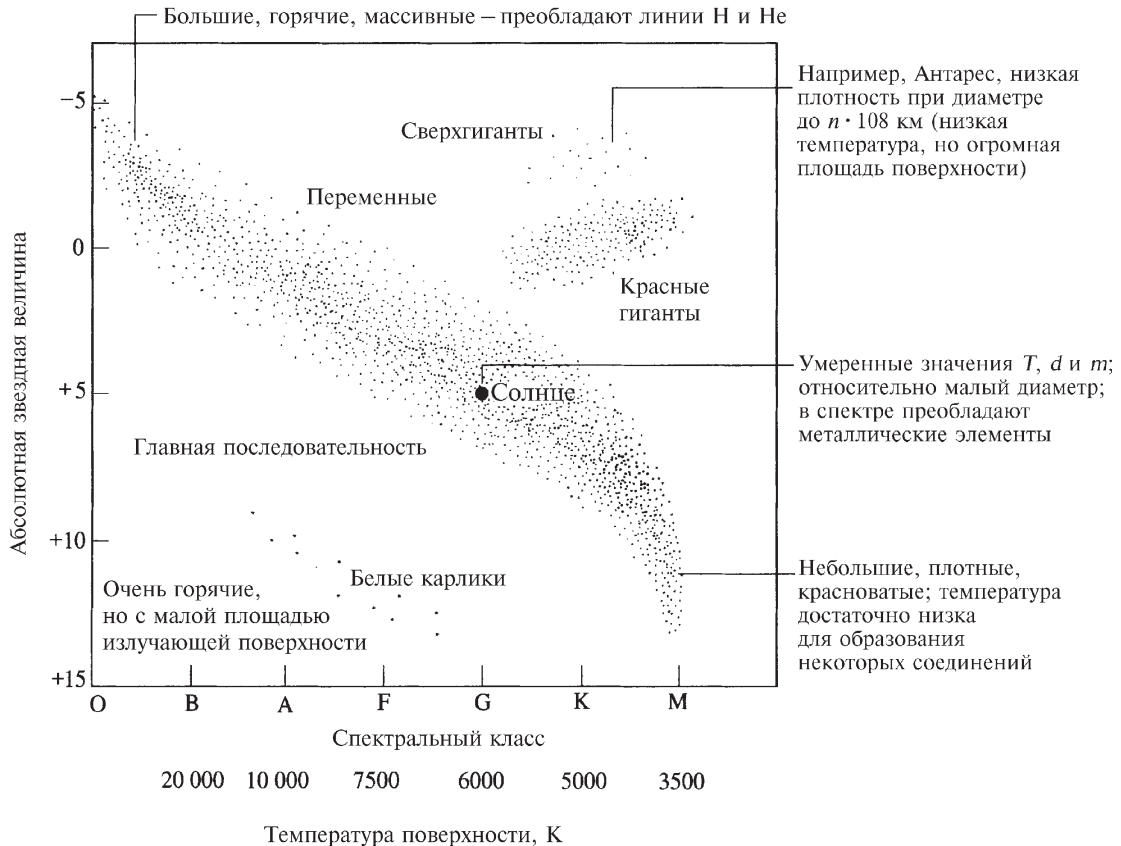


Рис. 1.2. Диаграмма Герцшпрунга–Ресселла для звезд с известной светимостью и спектральным классом

[. . .]

Химия элементов как развивающаяся дисциплина объединяет неорганическую, аналитическую, физическую, металлоорганическую, бионеорганическую химию и химическую технологию. Изложение предмета, базирующееся на Периодической системе элементов Д. И. Менделеева, доведено вплоть до конца XX в., и особое внимание уделено открытиям и интересным экспериментам последнего времени. Огромный фактический материал представлен в рамках общепринятых теоретических концепций.

Авторы по-настоящему очарованы химией и легко увлекают за собой читателя.

Этот лучший зарубежный учебник для студентов и аспирантов химических вузов будет также полезным справочником для преподавателей и научных работников.