

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Физико-механический институт
Высшая школа прикладной математики и вычислительной физики

А.Н. Баженов, А.Ю. Тельнова

ИЗОТОПЫ И ТАБЛИЦА МЕНДЕЛЕЕВА

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2024

УДК 544.116.027, 54.027, 54.021, 54.081, 544.58, 539.1, 539.183.2, 546.02

Аннотация

В пособии рассмотрена современная версия таблицы Менделеева с интервальными значениями атомных весов, разработанная Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC, приводятся терминология и изотопные данные.

Дана общая картина «изотопного океана» в природе и на Земле. Элементы таблицы Менделеева обсуждаются с точки зрения наличия у них стабильных изотопов и их количества. На качественном уровне приводятся пояснения наличия в природе стабильных изотопов. Кратко приведены некоторые сведения из ядерного нуклеосинтеза.

Для различных диапазонов масс атомных элементов (легкие, средние и тяжёлые) очерчены характерные особенности свойств изотопов. Обсуждаются мало освещённые в популярном изложении случаи «отсутствующих на Земле» изотопов элементов технеция и прометия, поясняются случаи существования элементов с одним изотопом и закономерности относительной распространённости элементов с двумя изотопами. Для радиогенных изотопов аргона и свинца даны пояснения их генезиса и распространённости на Земле.

Для математического описания и практических вычислений представлены понятия, методы и инструменты анализа данных с интервальной неопределённостью применительно к тематике изотопов. Обсуждается цель ближайших исследований — выяснение условий прослеживаемости изотопных подписей в природных и синтезированных образцах веществ.

Пособие адресовано всем, кто интересуется современным естествознанием в различных областях и применению математики к решению практических задач. В пособии содержится большое количество табличных данных, на основании которых можно проводить вычисления.

Оглавление

Введение	12
1 Изотопы элементов в ядерной физике	16
1.1 Сведения из ядерной физики	16
1.1.1 Экспериментальные факты про ядра, нуклоны, изотопы	18
1.1.2 Модели ядра	22
1.1.3 Изобары, изотопы	28
1.1.4 Распад атомных ядер	32
1.2 Стабильность атомных ядер	34
1.2.1 Стабильность атомных ядер в целом	35
1.2.2 Стабильность атомных ядер по отношению к различным видам распада	35
1.3 Ядерный нуклеосинтез	39
1.3.1 Процесс медленного нейтронного захвата	44
1.3.2 Процесс быстрого нейтронного захвата	48
1.4 Табличные данные по нуклеосинтезу	50
1.4.1 Графики данных по нуклеосинтезу	52
2 Изотопы на Земле и других планетах	58
2.1 Общие сведения о распространённости элементов и изотопов в земной коре	59
2.2 Редкие элементы	64
2.2.1 «Отсутствующие» элементы	65
2.3 Элементы — моноизотопы	69
2.3.1 Случай бериллия.	70
2.3.2 Случай фтора.	71

2.4	Элементы с двумя стабильными изотопами	72
2.4.1	Случай хлора.	75
2.4.2	Случай меди.	77
2.5	Элементы с многими стабильными изотопами	77
2.5.1	Случай олова	80
2.6	Примеры нуклеосинтеза, отличного от солнечной системы	81
2.6.1	Фракционирование изотопов в природе.	82
2.6.2	Изотопная планетология	82
2.7	Масштабы времени природных явлений	85
2.7.1	Ядерные масштабы времени	85
2.7.2	Различные масштабы времени в эволюции Земли	87
2.7.3	Козволюция природных явлений на Земле	92
3	Периодическая таблица элементов и изотопов	95
3.1	Таблица Менделеева с изотопными данными	95
3.2	Таблица стандартных атомных весов	99
4	Данные IUPAC-2021. «Особые элементы» на Земле.	102
4.1	Аргон	103
4.1.1	Изотопы аргона	103
4.1.2	Изотопы аргона на Земле	104
4.2	Свинец	108
4.2.1	Происхождение изотопов свинца	108
4.2.2	Изотопы свинца на Земле	114
5	Описание изотопных данных	117
5.1	Интервальный анализ	117
5.1.1	Классическая интервальная арифметика $\mathbb{IR}$. . .	118
5.1.2	Полная интервальная арифметика (Каухера) $\mathbb{KR}$	121
5.1.3	Составные интервальные объекты	122
6	Численные данные по нуклеосинтезу и распространённости изотопов элементов	125
6.1	Табличные данные по группам элементов	125
7	Численные данные по изотопам биогенных элементов	138
7.1	Измерения величины δ изотопов.	138
7.2	Численные данные по изотопам водорода	139
7.3	Численные данные по изотопам углерода	142
7.4	Численные данные по изотопам кислорода	144

Литература	147
Предметный указатель	154

Список иллюстраций

1.1	Кварковая структура нейтрона (udd) и протона (uud) . .	17
1.2	Рассеяние нейтрона и протона с обменом π -мезоном . . .	17
1.3	$N - Z$ диаграмма атомных ядер	19
1.4	Выгрузка данных в формате csv с сайта https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/	20
1.5	Моды распада изотопов лития	21
1.6	Рисунок, иллюстрирующий ядро как каплю несжимае- мой жидкости	23
1.7	Удельная энергия связи ядра, рассчитанная по формуле Вейцзеккера	23
1.8	Эмпирические протонные и нейтронные уровни оболочек	25
1.9	Энергия первого возбуждённого состояния ядра в коор- динатах (N, Z)	26
1.10	Энергия первого возбуждённого состояния ядра Sn—Pb .	27
1.11	Энергия первого возбуждённого состояния ядра	27
1.12	Гистограмма числа изотопов химических элементов в ко- ре Земли	29
1.13	Гистограмма числа изотопов химических элементов в ко- ре Земли с чётным и нечётным количеством нуклонов .	31
1.14	Число изотопов для химических элементов	31
1.15	$N - Z$ диаграмма атомных ядер	33
1.16	Диаграмма Фейнмана для бета-минус распада нейтрона	33
1.17	График энергии всех видов распада	35
1.18	График энергии протонных и нейтронных распадов . . .	36
1.19	График энергии альфа-распада	37
1.20	График энергии бета-распада и электронной конверсии .	38
1.21	Происхождение элементов	39
1.22	Реакции, важные для нуклеосинтеза [17]	40

1.23	Относительная распространенность нуклидов от атомной массы [19]	41
1.24	Схематическое изображение распространенности нуклидов от атомной массы [19]	42
1.25	Иллюстрация хода s - и r -процессов [24]	43
1.26	Области (n, γ) , β^- , EC	44
1.27	Иллюстрация хода s - и r -процессов [19]	45
1.28	Сечение захвата нейтрона изотопами бора — Википедия	45
1.29	Сечения захвата тепловых нейтронов	46
1.30	s -процесс после группы железа [22]	48
1.31	Сечения захвата тепловых нейтронов для изотопов свинца и висмута	48
1.32	Завершение s -процесса в области изотопов свинца и висмута [23]	49
1.33	Способы синтеза изотопов с указанием преобладания s - или r -процесса [21]	49
1.34	Нуклеосинтез изотопов Таблицы Менделеева	52
1.35	Нуклеосинтез изотопов лёгких элементов и группы стабильности	53
1.36	Нуклеосинтез изотопов Таблицы Менделеева	53
1.37	Нуклеосинтез изотопов редкоземельных элементов Таблицы Менделеева	57
2.1	Строение планеты Земля — Википедия	58
2.2	Распространённость химических элементов в коре Земли	60
2.3	Распространённость химических элементов в коре Земли, превышающая 10 ppm	60
2.4	Распространённость изотопов химических элементов в коре Земли	61
2.5	Отношение распространённости изотопов химических элементов в коре Земли	62
2.6	Распространённость изотопов химических элементов в коре Земли	63
2.7	Относительные распространённости изотопов химических элементов $Z=1-18$ в коре Земли	64
2.8	Относительные распространённости изотопов химических элементов $Z=55-92$ в коре Земли	64
2.9	Изотопы Tc, Mo и Ru	65
2.10	Стабильные изотопы Mo и Ru — чёрные квадраты	66

2.11	Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Tc, Mo и Ru	66
2.12	Периоды полураспада изотопов Tc	67
2.13	Распространенность изотопов молибдена и рутения . . .	68
2.14	Изотопы Nd, Pm и Sm	68
2.15	Стабильные изотопы Nd, Pm и Sm — чёрные квадраты .	68
2.16	Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Pm, Nd и Sm	69
2.17	Периоды полураспада изотопов Pm	70
2.18	Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов O, F и Ne	71
2.19	Элементы с двумя стабильными изотопами Часть рис. 1.14	74
2.20	Элементы с двумя стабильными изотопами. Часть рис. 1.14	74
2.21	Отношение распространённости изотопов химических элементов в коре Земли	75
2.22	Стабильные изотопы S Cl Ar — чёрные квадраты	76
2.23	Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Cl, S и Ar	76
2.24	Стабильные изотопы Ni Cu Zn — чёрные квадраты . . .	77
2.25	Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Cu, Ni и Zn	78
2.26	Гистограмма числа изотопов химических элементов в коре Земли	78
2.27	Число изотопов для химических элементов	79
2.28	Стабильные изотопы Sn In Sb — чёрные квадраты	80
2.29	Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Sn, In и Sb	80
2.30	Время жизни изотопов свинца	86
2.31	Массовые вымирания на Земле	89
2.32	Спектральная плотность изотопа кислорода в бентосе . .	90
2.33	Реконструкция континентов в Девонском периоде	92
2.34	Ten stages of mineral evolution of terrestrial planets. . . .	93
2.35	Рост разнообразия минералов бериллия [28]	94
3.1	Таблица Менделеева элементов и изотопов [46]	96
3.2	Представление кислорода в таблице Менделеева	97
3.3	Распространённость изотопов ртути на Земле	98
3.4	Способы иллюстрации атомных весов	100

4.1	Период полураспада изотопов аргона и его стабильные изотопы	103
4.2	Распространённость изотопов калия и аргона на Земле. .	104
4.3	Распространённость изотопов аргона, калия и кальция в земной коре	105
4.4	Вариации атомного веса (чёрные линии) аргона, $A_r(Ar)$, и значения долей (розовые линии) изотопа ^{36}Ar , $\chi(^{36}Ar)$, для некоторых веществ	105
4.5	Представление аргона в таблице Менделеева	107
4.6	Представление свинца в таблице Менделеева	108
4.7	Виды распадов от урана до свинца	109
4.8	Серия тория	110
4.9	Серия тория, трёхмерное представление	112
4.10	Ряды тория, радия и актиния — основные ветви	113
4.11	Ряд актиния в координатах (N, Z)— все ветви	114
4.12	Вариации изотопа ^{204}Pb в различных объектах	115
5.1	Твины на вещественной оси	123
5.2	Мультиинтервал в $\mathbb{R}$	123
7.1	Данные по изотопам водорода для различных веществ .	140
7.2	Данные по изотопам углерода для различных веществ .	143
7.3	Данные по изотопам кислорода для различных веществ	144

Список таблиц

1.1	Распределение естественных изотопов по правилу чётности нуклонов	29
1.2	Количество стабильных изотопов различных элементов на Земле	30
1.3	Распространённость нуклидов в Солнечной системе — Обозначения столбцов	50
1.4	Распространённость нуклидов, H—He	51
1.5	Распространённость нуклидов в Солнечной системе, Pb—U	51
1.6	Распространённость нуклидов, 2 период ТМ	54
1.7	Распространённость нуклидов, 3 период	55
1.8	Распространённость нуклидов в Солнечной системе, группа железа	56
2.1	Стабильные элементы — моноизотопы. Часть табл. 1.2	70
2.2	Элементы с двумя стабильными изотопами. Часть табл. 1.2	72
2.3	Элементы с двумя стабильными изотопами. Элементы с существенно разной распространённостью изотопов	73
2.4	Элементы с двумя стабильными изотопами. Элементы с сопоставимой распространённостью изотопов	73
2.5	Распределение естественных изотопов по правилу чётности нуклонов	79
2.6	Изотопные отношения для ряда планет	83
3.1	Обозначения на рис. 3.1.	96
3.2	Стабильные изотопы кислорода.	97
3.3	Стабильные изотопы ртути.	98
3.4	Таблица стандартных атомных весов 2021 — Обозначения столбцов	99

3.5	Таблица стандартных атомных весов 2021	101
4.1	Молярные интервалы изотопов аргона	107
4.2	Изотопы в ряду тория	111
4.3	Вариации изотопа ^{204}Pb в осадочных породах, $\chi^{204}\text{Pb}$. . .	116
6.1	Распространённость нуклидов — Обозначения столбцов .	126
6.2	Распространённость нуклидов, H—Si	127
6.3	Распространённость нуклидов, P—V	128
6.4	Распространённость нуклидов, Cr—Ge	129
6.5	Распространённость нуклидов, As—Zr	130
6.6	Распространённость нуклидов, Nb—Ag	131
6.7	Распространённость нуклидов, Cd—Sb	132
6.8	Распространённость нуклидов, Te—Ba	133
6.9	Распространённость нуклидов, La—Gd	134
6.10	Распространённость нуклидов, Tb—Lu	135
6.11	Распространённость нуклидов, Hf—Ir	136
6.12	Распространённость нуклидов, Pt—U	137
7.1	Данные по изотопным вариациям для водорода	140
7.2	Данные по вариациям атомной массы для водорода . . .	141
7.3	Данные по δ -отклонениям от стандарта VSMOW для во- дорода	141
7.4	Данные по вариациям атомной массы для углерода . . .	142
7.5	Данные по вариациям атомной массы для углерода . . .	142
7.6	Данные по вариациям атомной массы для кислорода . .	145
7.7	Данные по δ -отклонениям от стандарта VSMOW для кис- лорода	145

Введение

В пособии рассмотрена современная версия таблицы Менделеева, разработанная Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC. В настоящее время атомные веса многих элементов в ней заданы интервальными значениями. Причиной этого является наличие у химических элементов различных изотопов, которые неравномерно распределены в природе вообще, и конкретно на Земле.

Исходно таблица Менделеева (ТМ) носила «химический» характер. Она описывала свойства элементов с точки зрения их способности формировать молекулы, составляющие природные и синтезированные человеком соединения. Классификация элементов по группам и периодам сообразно атомным массам позволила правильно расположить известные элементы в периодическом порядке, уточнить атомные веса, предсказать существование новых ранее неизвестных элементов. Со временем в таблицу были добавлены отсутствующие элементы и целые группы элементов: благородные газы, редкоземельные элементы и актиноиды.

С открытием в конце XIX в. явления радиоактивности началось развитие атомной и ядерной физики, что со временем привело к существенной трансформации представлений о природе. Были созданы и развиты модели атома, квантовая механика, теория атомного ядра, современные представления о Вселенной. Атомные массы в ТМ были заменены на электрические заряды ядер. Было выяснено, что атомные массы элементов не есть их базовая характеристика. Напротив, то что казалось фундаментом материи, оказалось группами островков и отдельными островами стабильных изотопов в море возможных ядерных конфигураций. Изотопные композиции оказались преимущественным способом существования элементов в природе, а атомные веса — производными величинами.

С выходом человечества в Космос и развитием новых методов анализа состава вещества, их применения в науках о Земле и биологии, созданием планетной и звездной космохимии и астробиологии, изотопной планетологии, изучения элементного и изотопного состава звёзд, ситуация с атомными весами в таблице Менделеева ещё раз изменилась.

Теперь следует говорить о таблице Менделеева как способе описания элементов на конкретной планете Солнечной системы Земле с её специфической геологической и биологической историей, с взаимодействием с Космосом в конкретном месте Галактики и в текущее время планетной эволюции. На других планетах и иных космических объектах, на других этапах их геологического развития и этапах существования специфических форм жизни, наличие и распространённость изотопов различных элементов другие.

Вследствие различия распространённости изотопов, различаются и атомные веса элементов. Для первого знакомства с предметом в пособии приводятся необходимые сведения по ядерной физике и нуклеосинтезу, об изотопных распределениях в живой и неживой природе на Земле.

С другой стороны, в фундаментальных и прикладных применениях изотопных данных уже давно существует потребность в их удобном представлении и обработке. Специфика изотопных данных такова, что популярные методы, основанные на теоретико-вероятностном подходе, далеко не всегда адекватны. В пособии представлен подход с интервальным описанием данных в виде специальных объектов — твинов. Формулируются вопросы по способам представления данных и выбору способов их обработки с целью сохранения изотопных особенностей, важных для предметных областей.

Обратимся к истории атомных весов. В середине XIX века многие исследователи пытались найти закономерности химических свойств элементов. Наиболее удачной оказалась система Д.И.Менделеева. Его пионерская статья «Соотношение свойств с атомным весом элементов» была опубликована в Журнале Русского Химического Общества в 1869 г. [1]. В то же время таблица была аннотирована в Германии [2] и стала достоянием научной общественности. В дальнейшем Менделеев развил свои идеи и дал название предложенной системе *Периодический закон* [3].

Истории создания Периодической таблицы элементов посвящена обширная библиография. В книгах [4, 5, 6] дано краткое изложение ос-

новых вех этого процесса, а также освещены экспериментальные исследования и создание теории электронного строения атомов и ядер химических элементов, которые привели к созданию науки об изотопах. В настоящее время идёт процесс более подробного представления этой системы, которая теперь называется *Периодическая таблица элементов и изотопов*. Тем самым привычная таблица Менделеева дополняется ещё одним измерением — ядерным.

Это измерение, привычное для ядерных физиков, а также для специалистов в ряде дисциплин геологии, палеонтологии и биологии, ещё не является общеизвестным для более широкой научной общественности. Есть потребность в разнообразной литературе для популяризации терминологии, понятийной базе, методологии и развитии прикладных программных средств обработки данных, без чего немислима работа современного исследователя.

В пособии дана общая картина «изотопного океана» в природе и на Земле. Элементы таблицы Менделеева обсуждаются с точки зрения наличия у них стабильных изотопов и их количества. Для радиогенных изотопов аргона и свинца даны пояснения их генезиса и распространённости на Земле. Приводится большое количество иллюстраций, как заимствованных, так и построенных на основе изотопных данных, находящихся с открытым доступе.

Кратко обсудим состав пособия. Оно состоит из 5 содержательных глав, главы с табличными данными и Заключение.

В первой главе даются сведения из ядерной физики, необходимые для понимания изотопной тематики. Обсуждается представление о изотопах химических элементах как представителям некоторого нуклонного сообщества («океан изотопов»).

Во второй главе приводятся сведения об изотопных распределениях на Земле. На качественном уровне приводятся пояснения наличия в природе стабильных изотопов. Для различных диапазонов масс атомных элементов (легкие, средние и тяжёлые) очерчены характерные свойства свойств изотопов. Обсуждаются мало освещённые в популярном изложении случаи «отсутствующих на Земле» изотопов элементов технеция и прометия, поясняются случаи существования элементов с одним изотопом и закономерности относительной распространённости элементов с двумя изотопами.

В третьей главе рассмотрена современная версия таблицы Менделеева с интервальными значениями атомных весов, разработанная Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC и таб-

лица стандартных атомных весов.

В четвертой главе обсуждаются данные данные IUPAC-2021, относящиеся к «особым элементам» на Земле, аргону и свинцу. Подавляющая часть изотопов этих элементов не присутствовала на нашей планете в период её формирования, а возникла в ходе ядернофизических процессов в течение жизни нашей планеты.

В пятой главе кратко обсуждаются понятия, методы и инструменты анализа данных с интервальной неопределённостью применительно к тематике изотопов. Приводятся примеры интервальных вычислений со специальными математическими объектами — твинами, ставится вопрос, в каких видах вычислений, и с какого рода данными возможно наиболее содержательное использование изотопной информации. Шестая и седьмая главы содержат табличные данные.

В Заключении кратко освещается место публикации в ряду других материалов и ставятся задачи на следующие публикации.

Глава 1

Изотопы элементов в ядерной физике

В настоящей главе даётся информация, необходимая для понимания природы изотопов. Сначала приводятся краткие сведения по ядерной физике. Далее рассматривается вопрос стабильности атомных ядер по отношению к их различным превращениям. Очень кратко обсуждаются некоторые вопросы нуклеосинтеза ядер в ходе эволюции Вселенной, предшествовавшему образованию Земли.

1.1 Сведения из ядерной физики

Атомное ядро — центральная часть атома, в которой сосредоточена основная его масса. Ядро заряжено положительно, заряд ядра определяет *химический элемент*, к которому относят атом. Размеры ядер атомов более чем в 10000 раз меньше размеров самого атома. Атомные ядра изучает *ядерная физика*.

В этом разделе приводятся сведения из ядерной физики [7], необходимые для понимания специфики изотопных данных. Атомное ядро состоит из *нуклонов* — положительно заряженных протонов и не имеющих заряд нейтронов, которые связаны между собой при помощи *сильного взаимодействия*. Сильное ядерное взаимодействие — одно из четырёх фундаментальных взаимодействий в физике. В сильном взаимодействии участвуют *кварки* и *глюоны* и составленные из них части-

цы, называемые адронами.

Кварк — бесструктурная элементарная частица и фундаментальная составляющая материи. Всё обычно наблюдаемое вещество состоит из двух видов кварков (u и d) и электронов. Кварки имеют дробный электрический заряд. Протон состоит из двух u-кварков и одного d-кварка, а нейтрон — из одного u-кварка и двух d-кварков. На рис. 1.1 представлена кварковая структура нейтрона и протона.

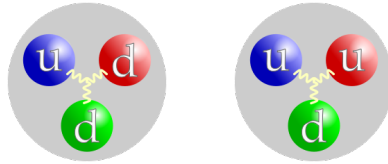


Рис. 1.1. Кварковая структура нейтрона (udd) и протона (uud)

Глюон — элементарная безмассовая частица, квант векторного поля, переносчик сильного взаимодействия. Кварки и нуклоны имеют полуцелый спин и по статистическим свойствам относятся к *фермионам*. Глюоны, подобно фотонам, имеют целый спин и являются *бозонами*.

Нейтрон и протон могут переходить друг в друга посредством обмена π -мезонами. Мезоны — составные элементарные частицы, состоящие из равного числа кварков и антикварков.

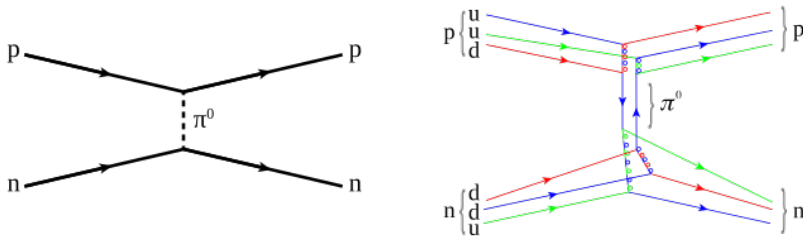


Рис. 1.2. Рассеяние нейтрона и протона с обменом π -мезоном

На рис. 1.2 приведена *диаграмма Фейнмана*, иллюстрирующая рассеяние нейтрона и протона с обменом π -мезоном.

С точки зрения сильного взаимодействия, протон и нейтрон являются одинаковыми частицами, а многие другие свойства у них также близки. Поэтому была разработана модель, по которой любой нуклон обладает *изотопическим спином*, равным $1/2$, у которого есть две

возможные «проекции» в особом изотопическом пространстве. Когда проекция изотопического спина I_z равна $+1/2$, то нуклон становится протоном, а когда $-1/2$ — нейтроном.

Для не слишком тяжёлых ядер, когда кулоновское отталкивание протонов относительно невелико, атомное ядро можно считать коллективным состоянием одинаковых частиц, отличающихся только изотопическим спином.

1.1.1 Экспериментальные факты про ядра, нуклоны, изотопы

Актуальным источником данных является база данных МАГАТЭ NUBASE2020 [14]. Интерактивные модели различных свойств данных размещены на сайте МАГАТЭ [47] и на других ресурсах, например, <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/> и <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>. В статье [17] подробно описаны источники данных для ядерной физики и ядерного нуклеосинтеза. Описание формата данных ENSDF [16].

Далее описан способ получения информации о ядерных данных.

NZ -диаграммы. Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. Принято обозначать количество протонов в ядре как Z , это также соответствует номеру химического элемента в периодической таблице. Число нейтронов обозначают как N . Для представления свойств атомных ядер элементов и изотопов используют так называемые $N - Z$ диаграммы (диаграммы Сегре), на которых по осям отложены Z и N , а интересующая величина отображается в первом ортанте.

Пример $N - Z$ диаграммы приведен на рис. 1.3. На данном графике строки соответствуют ядрам с одинаковым числом протонов, а столбцы — ядрам с одинаковым числом нейтронов.

Черным цветом на рис. 1.3 выделены стабильные ядра, так называемая долина стабильности атомных ядер. Справа от долины стабильности располагаются ядра, испытывающие β^- -распад, слева — ядра, испытывающие β^+ -распад и e^- -захват. В области больших $A = N + Z$ находятся ядра, испытывающие α -распад, и спонтанно делящиеся ядра.

Линия $B_p = 0$ (proton drip-line) ограничивает область существования атомных ядер слева, то есть невозможно существование ядер с большим числом протонов. Линия, ограничивающее число нейтронов, $B_n = 0$ (neutron drip-line) находится справа.

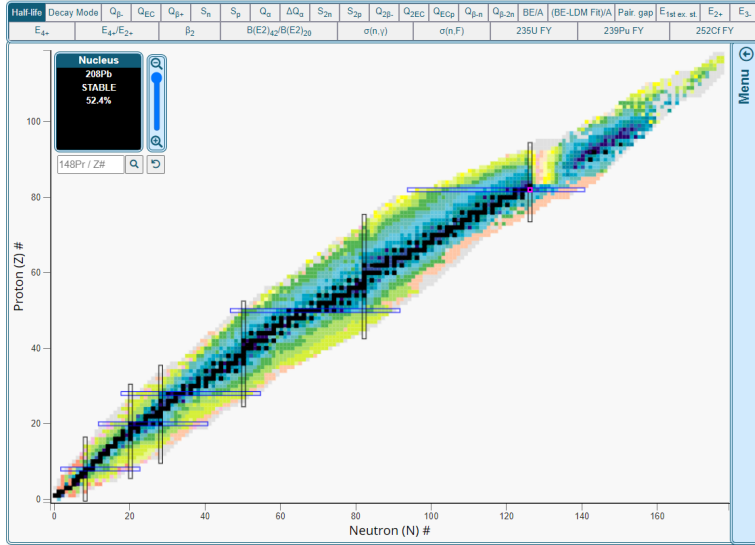


Рис. 1.3. $N - Z$ диаграмма атомных ядер
По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/> [15]

На Рис. 1.3 большинство элементов лежит ниже прямой $N = Z$. Это соответствует тому, что протоны испытывают электростатическое отталкивание, а нейтроны — нет. Также на Рис. 1.3 выделены ядра содержащие 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 нуклонов. Экспериментальные исследования показали, что данные ядра являются наиболее устойчивыми, за что они были названы «магическими». На устойчивость ядер влияет и четное или нечетное количество нуклонов. Так, было установлено, что чётно-чётные ядра (имеющие чётное количество как протонов, так и нейтронов) являются более устойчивыми, чем чётно-нечётные и нечётно-нечётные ядра.

$N - A$ -диаграммы. Представление свойств атомных ядер в координатах (N, Z) не единственно. В тех случаях, когда есть привязка к атомному весу изотопа, удобнее представлять данные в координатах (N, A) . Дополнительным преимуществом (N, A) координат является тот факт, что превращения ядер, связанные с излучением или захватом электрона, в этих координатах происходит с изменением Z и

без изменения значения A . В то же время, в координатах (N, Z) при этом изменяется также и значение N . Например, см. рис.4.8 в §4.2.1 «Происхождение изотопов свинца».

Для того, чтобы использовать данные для проведения расчётов и построения графиков, можно эти данные выгрузить с ресурса <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>. Он предоставляет возможность выгрузки данных в csv-формате.

Например, для выгрузки величин моды распада, распространённости изотопов и энергий, высвобождаемых в процессах бета-распада и электронного захвата, надо выбрать в интерфейсе поля базы данных Abundance, Decay Mode, $Q\beta^-$, QEC, как это показано на рис. 1.4

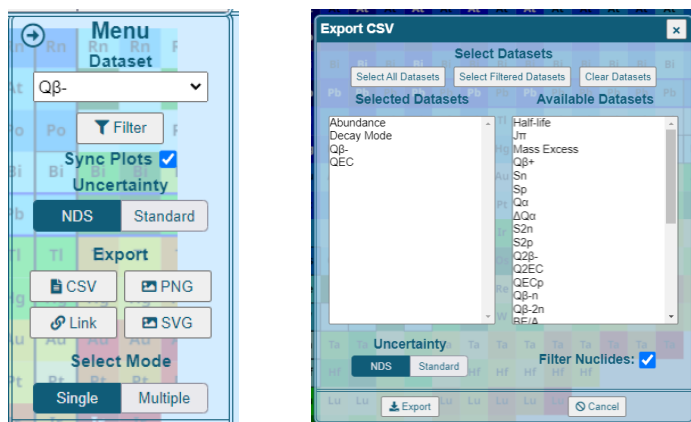


Рис. 1.4. Выгрузка данных в формате csv с сайта <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

При этом данные экспортируются в csv-файл. В момент экспорта можно выбрать различные возможности, и в результате формируется текстовый файл. В первой строчке содержится легенда данных. Ниже приведён фрагмент файла.

```
z,n,name,decayModes,abundance,betaMinus(keV),electronCapture(keV)
0,1,Neutron,B- = 100.00,,782.347,
1,0,1H,,99.9885%,,-782.347
1,1,2H,,0.0115%,,
1,2,3H,B- = 100.00,,18.59202,
1,3,4H,N = 100.00,,22200,
```

1,4,5H,2N = 100.00,,21660,
 1,5,6H,N = 100.00,,24300,
 1,6,7H,2N? , ,23100,
 ...
 118,177,2950g,, ,

Всего в выгружаемых файлах содержится 6658 строк, включая строку легенды. Это значение отвечает общему количеству мод распада и превышает число стабильных изотопов.

Рассмотрим для иллюстрации моды и вероятности распадов лития. В интерфейсе программы на <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/> эти данные выглядят как показано на рис. 1.5.

3Li	4Li 6.03 mev	5Li ≈ 1.5 mev	6Li STABLE 7.59%	7Li STABLE 92.41%	8Li 839.9 ms	9Li 178.3 ms	10Li	11Li 8.75 ms
p ?	p = 100.00%	α = 100.00% p = 100.00% -2.54E+4	-4.28E+3	-8.61E+2	β ⁻ = 100.00% β ⁺ α = 100.00% 1.60E+4	β ⁻ = 100.00% β ⁺ n ? 50.00% 1.36E+4	N = 100.00% 2.04E+4	β ⁻ = 100.00% β ⁺ n = 86.60% 2.05E+4

Рис. 1.5. Моды распада изотопов лития

Для изотопа ${}^5\text{Li}$ при выгрузке из базы данных его распаду

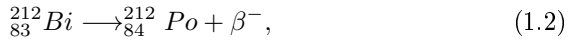


отвечают 2 строки

3,2,5Li,A = 100.00,, -25500,450
 3,2,5Li,P = 100.00,, -25500,450

Обе эти записи отвечают реакции (1.1).

Если изотоп имеет более одной моды распада, как например в случае изотопа висмута-212



Распадам (1.2) и (1.3) отвечают записи

83,130,213Bi,B- = 97.80,,1422,-2028
 83,130,213Bi,A = 2.20,,1422,-2028

Вероятность процесса (1.2) составляет 97.8%, а процесса (1.3) — 2.2%. Реакция (1.2) будет участвовать как промежуточный агент в ряде тория в §4.2.1.

1.1.2 Модели ядра

Свойства ядер весьма сложны. Протоны и нейтроны участвуют во всех видах известных взаимодействий, сильных, слабых, электромагнитных и гравитационных. Помимо того, что взаимодействия нуклонов сложное, их количество в ядрах достаточно велико и имеет место проблема многочастичной системы, которую невозможно описать точно. В то же самое время число нуклонов не так велико, чтобы можно было применять статистические методы.

Поэтому нет такой теоретической модели ядер, которая бы успешно количественно объясняла все их наблюдаемые свойства. Для начального представления о моделях следует упомянуть капельную и оболочечную модели ядра.

Дадим очень краткое изложение основных моделей атомных ядер.

Капельная модель ядер. Капельную модель ядер Н.Бор предложил в 1936. В данной теории ядро представляется сферической каплей некоторой заряженной несжимаемой сверхплотной жидкости, называемой ядерной. Помимо выше перечисленных свойств, к свойства ядра-капли можно добавить поверхностное натяжение, разделение капли на более мелкие (деление ядер), а также слияние небольших капель в капли побольше (синтез ядер). Основным достижением данной модели стала полуэмпирическая формула Вейцеккера для энергии связи ядра Weizsacker:

$$E = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/2}} - \epsilon \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta A^{-3/4}, \quad (1.4)$$

где $\delta = +|\delta|$, для четно-четных ядер, $\delta = -|\delta|$, для ядер с нечетным A и $\delta = 0$ для нечетно-нечетных ядер. $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - эмпирические коэффициенты.

Удельная энергия связи ядра в зависимости от массового числа A имеет следующий вид:

Рассмотрим подробнее смысл всех слагаемых формулы (1.4). Собственно капельной аналогии соответствуют первые три члена формулы. Первое слагаемое, пропорциональное массовому числу A , описывает постоянство удельной энергии связи ядер. Второй член учитывает, поправку на уменьшение полной энергии связи, обусловленную тем, что часть нуклонов находится у поверхности ядра, т. е. нуклоны, находящиеся на поверхности имеют меньше связей, чем частицы внутри

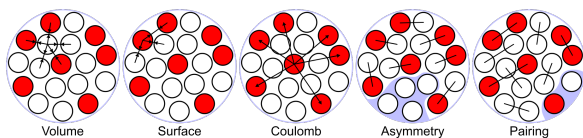


Рис. 1.6. Рисунок, иллюстрирующий ядро как каплю несжимаемой жидкости с грубым учётом наблюдаемых вариаций энергии связи — https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_nucleus

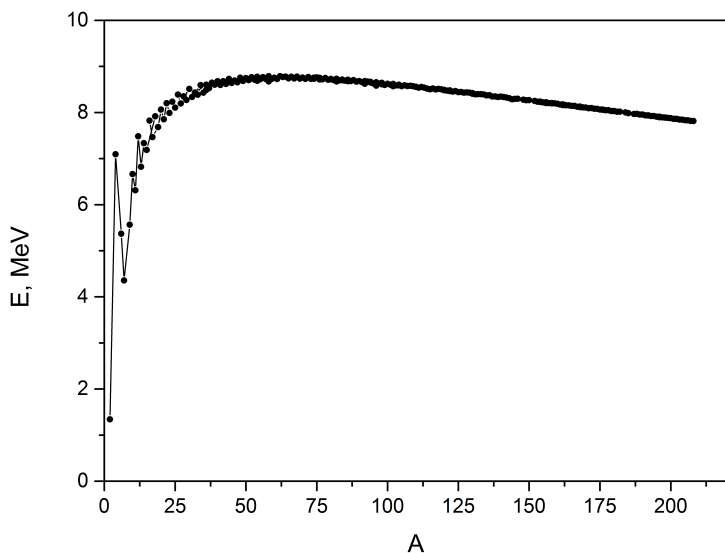


Рис. 1.7. Удельная энергия связи ядра, рассчитанная по формуле Вейцеккера

него. Это поправка на поверхностное натяжение. Третий член определяет взаимное кулоновское расталкивание протонов. В модели предполагается, что электрический заряд протонов равномерно распределен внутри сферы ядра. Данный коэффициент может быть вычислен на основании представления о равномерном распределении электрического заряда по объёму сферы с заданным радиусом.

Два последних слагаемых уже не следуют из модели жидкой капли.

Четвертое слагаемое учитывает симметрию ядра и отражает тенденцию к стабильности ядер с $N = Z$. Этот член — поправка на энергию симметрии, отражает наблюдаемую в природе тенденцию к симметрии в строении ядер. Пятое слагаемое — энергия спаривания, которая учитывает повышенную стабильность основных состояний ядер с чётным числом протонов и/или нейтронов. Этот член отражает распространенность стабильных элементов и учитывает эффект спаривания одинаковых нуклонов.

В целом график на рис. 1.7 удовлетворительно отображает общий ход зависимости удельной энергии связи ядер в зависимости от массового числа A .

Оболочечная модель ядра. Однако капельная модель ядра оказалась не универсальной. Накопленный экспериментальный опыт свидетельствовал, что стабильность ядер зависит от количества нуклонов, находящихся в них.

Экспериментальные исследования атомных ядер выявили некоторую периодичность в изменении индивидуальных характеристик (энергии связи, спины, магнитные моменты, четности, некоторые особенности α - и β -распадов) основных и возбужденных состояний атомных ядер. Обнаруженная периодичность подобна периодичности свойств электронных оболочек атома и определяется так называемыми *магическими* числами нейтронов и протонов.

В частности, было обнаружено, что наибольшую энергию связи имеют ядра с *магическими* числами нейтронов и протонов, равными

$$N \quad 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 184(?) \quad (1.5)$$

$$Z \quad 2, 8, 20, 28, 50, 82, 114(?) \quad (1.6)$$

Особой стабильностью характеризуются так называемые дважды магические ядра, в которых количества и протонов, и нейтронов составляют магические числа. В природе существуют следующие дважды магические ядра:

$${}^A_Z\text{Element}^N : {}^4_2\text{He}^2, {}^{16}_8\text{O}^8, {}^{40}_{20}\text{Ca}^{20}, {}^{48}_{20}\text{Ca}^{28}, {}^{208}_{82}\text{Pb}^{126}.$$

Для объяснения данного факта, капельной модели было уже недостаточно. Точно также капельная модель не могла объяснить, почему, почему при делении ядра разваливаются на два осколка разной массы.

Для объяснения этих феноменов была придумана оболочечная модель ядра.

Результатом работы по систематизации и обобщения огромного количества экспериментальных данных было создание в середине XX века модели оболочек атомных ядер. Эта модель позволяет не только объяснить многие закономерности свойств ядер, но и предсказывать возможные пути синтеза новых элементов.

Число нуклонов на ядерных оболочках равно соответственно

$$2 = 2, \quad (1.7)$$

$$8 = 2 + 6, \quad (1.8)$$

$$20 = 2 + 6 + 12, \quad (1.9)$$

$$28 = 2 + 6 + 12 + 8, \quad (1.10)$$

$$50 = 2 + 6 + 12 + 8 + 22 \quad (1.11)$$

$$82 = 2 + 6 + 12 + 8 + 22 + 32, \quad (1.12)$$

$$126 = 2 + 6 + 12 + 8 + 22 + 32 + 44, \quad (1.13)$$

$$184 = 2 + 6 + 12 + 8 + 22 + 32 + 44 + 58. \quad (1.14)$$

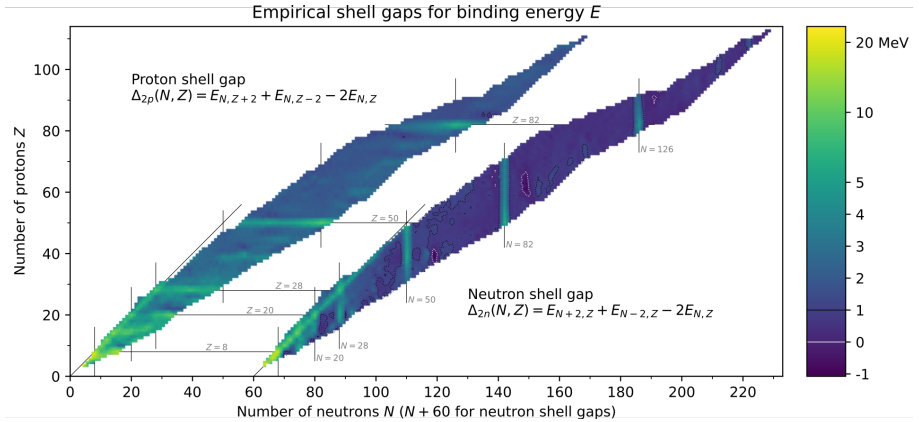


Рис. 1.8. Эмпирические протонные и нейтронные уровни оболочек , полученные из наблюдаемых энергий связи [13]

На рис. 1.8 приведены эмпирические протонные и нейтронные уровни оболочек, полученные из наблюдаемых энергий связи [13], а также

прямые $N = Z$. Расчёты соответствуют формулам

$$\Delta_{2p}(N, Z) = E_{N,Z+2} + E_{N,Z-2} - 2E_{N,Z}, \quad (1.15)$$

$$\Delta_{2n}(N, Z) = E_{N+2,Z} + E_{N-2,Z} - 2E_{N,Z}. \quad (1.16)$$

Оболочечная модель ядра является аналогией к модели электронных оболочек атома. Согласно этой модели, нуклоны в ядре расположены на оболочках, причём на каждой из них может находиться лишь определенное число нуклонов. Каждый энергетический уровень заполняется нуклонами независимо друг от друга. Каждый нуклон в ядре находится в определённом квантовом состоянии в соответствии с принципом Паули. Тогда ядра атомов с полностью заполненными оболочками, будут иметь повышенную устойчивость. Таким образом модель оболочек позволяет объяснить существование магических ядер. Тоже самое касается и деления ядер на неравные осколки: ядро стремится разрушиться так, чтобы ядра-осколки оказались с заполненными оболочками.

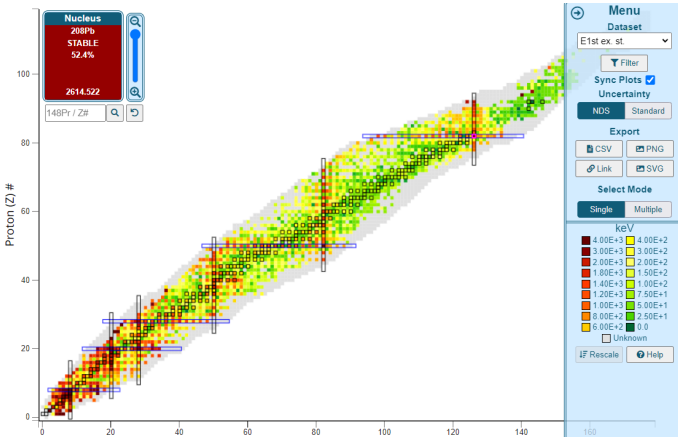


Рис. 1.9. Энергия первого возбуждённого состояния ядра в координатах (N, Z)

— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

На рис. 1.9 показаны энергии первого возбуждённого состояния ядер в координатах (N, Z) . График показывает, что в области магических чисел величина E_{1ext} резко возрастает.

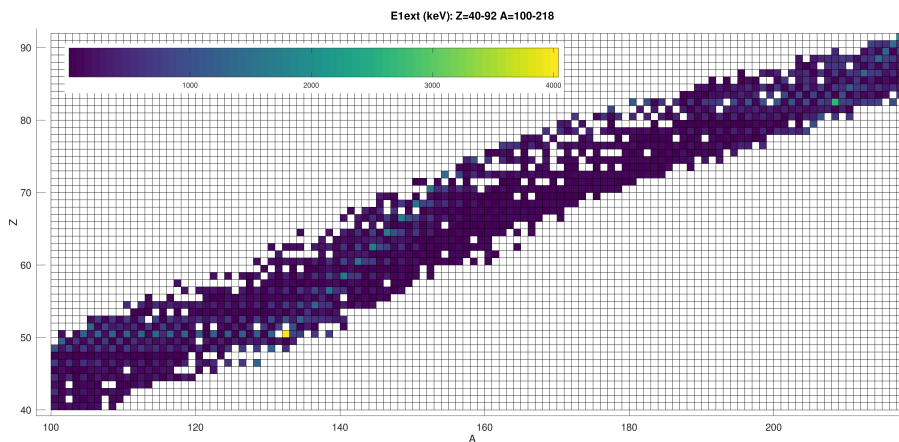


Рис. 1.10. Энергия первого возбуждённого состояния ядра Sn—Pb
— по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

На рис. 1.10 показаны энергии первого возбуждённого состояния ядер в координатах (N, Z) для диапазонов $A = 100\text{—}218$ и $Z = 40\text{—}92$. Резкие пики имеют место для магических ядер $^{132}_{50}\text{Sn}$ и $^{208}_{82}\text{Pb}$.

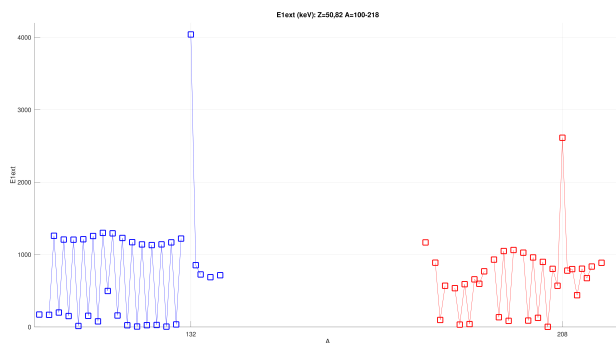


Рис. 1.11. Энергия первого возбуждённого состояния ядра
— по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

На одномерных графиках рис. 1.11 помимо острых пиков при $Z = 50$ и $Z = 82$ хорошо видна тенденция к более выгодным энергетическим

состояниям для чётных значений A .

Обобщённая модель ядра. Ряд ядер и их возбуждённых состояний не описываются удовлетворительно ни капельной, ни оболочечной моделями ядра. Обобщённая модель ядра учитывает и коллективные эффекты движений многих нуклонов, и одночастичные движения отдельных нуклонов в общем поле, создаваемом другими нуклонами. Таким образом удалось описать несферичность ядер и колебания формы ядра вокруг равновесной.

В целом спектроскопия возбуждённых состояний ядер и другие эксперименты свидетельствуют о большом количестве сложных эффектов в ядрах.

1.1.3 Изобары, изотопы

Атомные ядра, содержащие одинаковое число протонов и различное число нейтронов (то есть отличаются по массе, но не по заряду) называют *изотопы*. Существуют как устойчивые (стабильные), так и радиоактивные изотопы. Ядра с различным числом протонов и нейтронов, но с одинаковым суммарным числом нуклонов называют *изобарами*. Также, в ядерной физике применяется понятие *изотоны* для обозначения ядер с одинаковым числом нейтронов и разным числом протонов.

Что касается распространённости изотопов в природе, то имеется ряд закономерностей [8]. Оболочечная модель согласуется с эмпирическим правилом повышения устойчивости ядер, содержащих чётное число протонов и нейтронов — Табл. 1.1. Менее стабильны ядра с нечётным числом протонов, но чётным числом нейтронов (и наоборот). Неустойчивыми являются ядра, в которых число протонов и нейтронов нечётное. Последняя закономерность хорошо иллюстрируется распределением естественных известных природных изотопов по правилу чётности.

Для 24 элементов известно лишь по одному устойчивому изотопу. Такие элементы называют моноизотопными. Из них 23 элемента — с нечётными Z . У других элементов, преимущественно с чётными порядковыми номерами, число устойчивых изотопов доходит до 10 — Табл. 1.2.

В [9] в удобной приведены данные о количестве стабильных изотопов различных элементов на Земле. Приведём часть данных из этой публикации.

Число изотопов	N	Z	Примеры Табл. 1.2
166	чётное	чётное	1 изотоп — ${}_9F^{19} \dots {}_{83}Bi^{109}$ 2 изотопа — ${}_1H^{1,2} \dots {}_{81}Tl^{203,205}$
55	чётное	нечётное	
47	нечётное	чётное	${}_1H^2, {}_3Li^6, {}_5B^{10}, {}_7N^{14}, {}_{47}Ag^{109}$
5	нечётное	нечётное	

Таблица 1.1. Распределение естественных изотопов по правилу чётности нуклонов

В табл. 1.2 приведены данные о количестве стабильных элементов для различных химических элементов. Она организована по блокам следующим образом. В 10 горизонтальных блоках сгруппированы элементы, имеющие одинаковое количество стабильных изотопов, от одного до 10.

Система обозначения следующая. Изотопы элемента обозначены как ${}_zE^{N_1, N_2, \dots, N_k}$, z — заряд ядра. Величины $N_j = n_j + z$ указаны в верхнем индексе, электрический заряд z — в нижнем индексе. Число нейтронов n_j включено в N_j . Массив $\{N_j\}$ дан или перечислением всех изотопов (${}_{82}Pb^{204,206,207,208}$) или, в случае большого количества изотопов с непрерывно идущими номерами, с указанием диапазона атомных весов (${}_{50}Sn^{112,114-120,122,124}$).

На рис. 1.12 приведена гистограмма числа изотопов химических элементов в коре Земли.

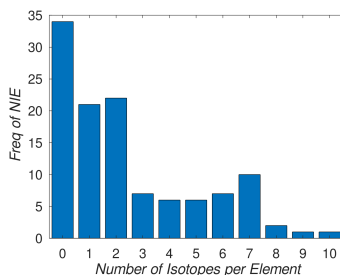


Рис. 1.12. Гистограмма числа изотопов химических элементов в коре Земли

По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

Число стабильных изотопов, k	Элементы, ${}_Z E^{N_1, N_2, \dots, N_k}$, z — заряд ядра, N_j — атомный вес изотопа j	Число элементов	Общее число изотопов
1	${}_4 Be^9$, ${}_9 F^{19}$, ${}_{11} Na^{23}$, ${}_{13} Al^{27}$, ${}_{15} P^{31}$, ${}_{21} Sc^{45}$, ${}_{23} V^{51}$, ${}_{25} Mn^{55}$, ${}_{27} Co^{59}$, ${}_{33} As^{75}$, ${}_{39} Y^{89}$, ${}_{41} Nb^{93}$, ${}_{45} Rh^{103}$, ${}_{53} I^{127}$, ${}_{55} Cs^{133}$, ${}_{57} La^{139}$, ${}_{59} Pr^{141}$, ${}_{65} Tb^{159}$, ${}_{67} Ho^{165}$, ${}_{69} Tm^{169}$, ${}_{71} Lu^{175}$, ${}_{75} Ta^{181}$, ${}_{79} Au^{197}$, ${}_{83} Bi^{209}$	24	24
2	${}_1 H^{1,2}$, ${}_2 He^{3,4}$, ${}_3 Li^{6,7}$, ${}_5 B^{10,11}$, ${}_6 C^{12,13}$, ${}_7 N^{14,15}$, ${}_{17} Cl^{35,37}$, ${}_{19} K^{39,41}$, ${}_{29} Cu^{63,65}$, ${}_{31} Ga^{69,71}$, ${}_{35} Br^{79,81}$, ${}_{37} Rb^{85,87}$, ${}_{47} Ag^{107,109}$, ${}_{49} In^{113,115}$, ${}_{63} Eu^{151,153}$, ${}_{76} Re^{185,187}$, ${}_{77} Ir^{191,193}$, ${}_{81} Tl^{203,205}$	19	38
3	${}_8 O^{16,17,18}$, ${}_{10} Ne^{20,21,22}$, ${}_{12} Mg^{24,25,26}$ ${}_{14} Si^{28,29,30}$, ${}_{16} Ar^{36,38,40}$, ${}_{58} Ce^{138,140,142}$	6	18
4	${}_{16} S^{32,33,34,36}$, ${}_{24} Cr^{50,52,53,54}$, ${}_{28} Fe^{54,56,57,58}$ ${}_{38} Sr^{84,86,87,88}$, ${}_{82} Pb^{204,206,207,208}$	5	20
5	${}_{22} Ti^{46-50}$, ${}_{28} Ni^{58,60,61,62,64}$, ${}_{30} Zn^{64,66,67,68,70}$ ${}_{32} Ge^{70,72,73,74,76}$, ${}_{40} Zr^{90,91,92,94,96}$, ${}_{74} W^{180,182,183,184,186}$	6	30
6	${}_{20} Ca^{40,42,43,44,46,48}$, ${}_{34} Se^{74,76,77,78,80,82}$ ${}_{36} Kr^{78,80,82,83,84,86}$, ${}_{46} Pd^{102,104,105,106,108,110}$ ${}_{68} Er^{162,164,166,167,168,170}$, ${}_{72} Hf^{174,176,177,178,179,180}$ ${}_{78} Pt^{190,192,194,195,196,198}$	7	42
7	${}_{42} Mo^{92,94-98,100}$, ${}_{44} Ru^{96,98-102,104}$, ${}_{56} Ba^{130,132,134-138}$, ${}_{60} Nd^{142-146,148,150}$, ${}_{62} Sm^{144,147-150,152,154}$, ${}_{64} Gd^{152,154-158,160}$, ${}_{66} Dy^{156,158,160-164}$, ${}_{70} Yb^{168,170-174,176}$ ${}_{76} Os^{184,186-190,192}$, ${}_{80} Hg^{196,198-202,204}$	10	70
8	${}_{48} Cd^{106,108,110-114}$, ${}_{52} Te^{120,122,123-126,128,130}$	2	16
9	${}_{54} Xe^{124,126,128-132,134,136}$	1	9
10	${}_{50} Sn^{112,114-120,122,124}$	1	10
		81	276

Таблица 1.2. Количество стабильных изотопов различных элементов на Земле

На рис. 1.13 приведёна гистограмма числа изотопов химических элементов в коре Земли с учётом чётности числа нуклонов.

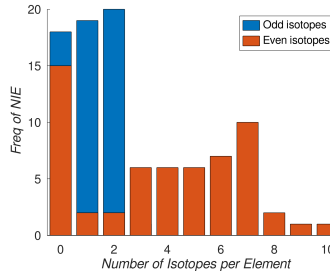


Рис. 1.13. Гистограмма числа изотопов химических элементов в коре Земли с чётным и нечётным количеством нуклонов
По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

На рис. 1.14 приведён график числа изотопов химических элементов в коре Земли с учётом чётности числа нуклонов.

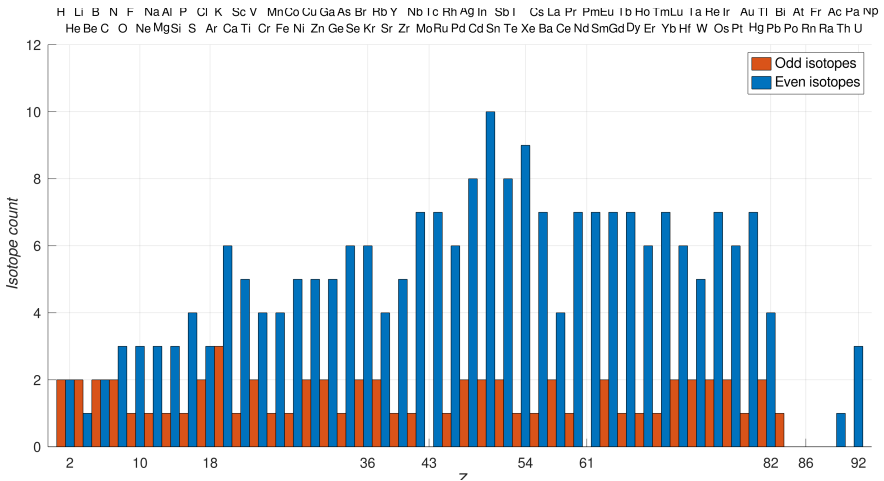


Рис. 1.14. Число изотопов для химических элементов
По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

Правило Щукарева-Маттауха. Для изобар справедливо *правило Щукарева—Маттауха*, объясняющее, в частности, отсутствие стабильных изотопов у технеция. Суть правила заключается в том, что в природе не могут существовать два стабильных изобара, заряды ядра которых отличаются на единицу. Другими словами, если у какого-либо химического элемента есть устойчивый изотоп, то его ближайшие соседи по таблице не могут иметь устойчивых изотопов с тем же массовым числом.

Рассмотрим этот вопрос в §2.2 «Редкие элементы».

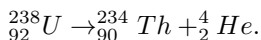
1.1.4 Распад атомных ядер

Как видно из Рис. 1.3, стабильность ядер — весьма редкое явление, и как уже обсуждалось выше, стабильность — понятие условное.

На Рис. 1.15 приведена $N - Z$ диаграмма атомных ядер с их модами распада. Следует отметить, что термин «распад» не вполне корректно отражает смысл процессов, происходящих с ядрами. В частности, при бета-распаде происходит увеличение электрического заряда и увеличение порядкового номера элемента. Больше подошло бы слово «превращение», но мы будем придерживаться традиционной терминологии.

Основными модами радиоактивного распада являются альфа- и бета-распады, гамма-распад (или изомерный переход). Также существует спонтанное деление ядер, протонный и кластерный распады.

Альфа-распад — вид распада, при котором ядро испускает ядро гелия, при этом заряд ядра уменьшается на два, а масса — на 4. Альфа-распад присущ тяжелым элементам (тяжелее свинца), например распад урана-238:



На Рис. 1.15 область ядер, испытывающих альфа-распад, обозначена жёлтым цветом.

Бета-распад — вид распада, при котором, испускается (или поглощается) электрон и антинейтрино, или позитрон и нейтрино. Существуют несколько типов бета-распада:

1. Электронный (бета-минус) распад (превращение нейтрона в протон);
2. Позитронный (бета-плюс) распад (превращение протона в нейтрон);

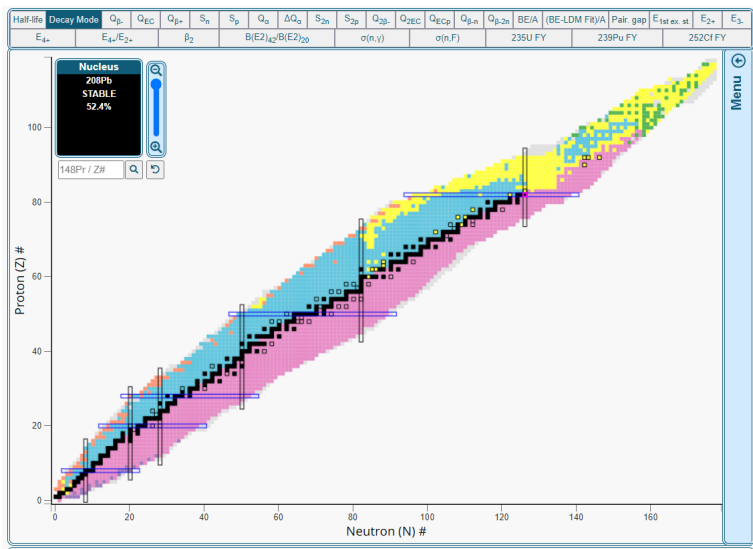


Рис. 1.15. $N - Z$ диаграмма атомных ядер
Моды распада атомных ядер <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

3. Электронный захват.

На рис. 1.16 показана диаграмма Фейнмана для бета-минус распада нейтрона. Переносчиком слабого взаимодействия является W^- -бозон.

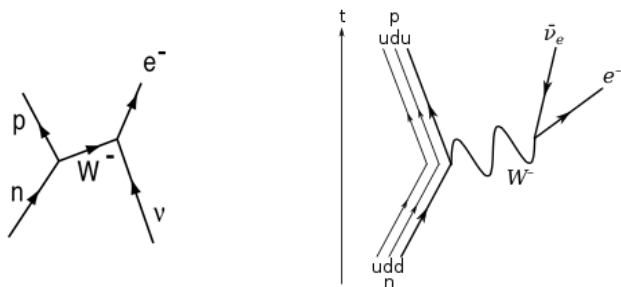
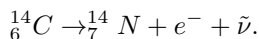


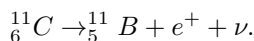
Рис. 1.16. Диаграмма Фейнмана для бета-минус распада нейтрона

Бета-минус (электронный распад) распад характерен для изотопов

с избытком нейтронов, например:

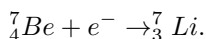


Изотоп углерода-14 испытывает бета-минус распад, превращаясь при этом в стабильный азот с испусканием электрона и антинейтрино. На Рис. 1.15 бета-минус распад изображен розовым цветом. Бета-плюс распад и электронный захват характерны для изотопов с недостатком нейтронов. Пример бета-плюс распада:



Изотоп углерода-11 испытывает бета-плюс распад, превращаясь в стабильный бор, при этом испускается позитрон и нейтрино.

При электронном захвате ядро захватывает электрон атома с собственной электронной оболочки. Электронный захват существенен для тяжелых ядер, у которых внутренняя оболочка расположена близко к ядру. Примером легкого ядра, захватывающего электрон является бериллий-7, захватывающий электрон и превращающийся в литий-7:



Бета-плюс распад и электронный захват на Рис. 1.15 изображены синим цветом.

Зеленым цветом на Рис. 1.15 обозначены тяжелые ядра, которым присуще спонтанное деление. Также на рисунке, в области легких ядер, присутствуют нейтроноизбыточные (фиолетовые) и протоноизбыточные ядра (оранжевые). Такие изотопы распадаются испуская нейтрон (несколько нейтронов) или протон соответственно.

1.2 Стабильность атомных ядер

Важнейшей характеристикой изотопов химических элементов является их стабильность по отношению к различным модам превращений. Изложенный в §1.1.4 материал носит качественный характер. Для получения более точных представлений об изотопах в природе нужны уже количественные данные о принципиальной возможности различных процессов и их вероятности.

1.2.1 Стабильность атомных ядер в целом

Для атомных ядер эти данные содержатся в виде численных зависимостей различных возбуждений ядра. Стабильность атомных ядер возможна, если не одно из возбуждений не способно перевести конкретное атомное ядро в энергетически более выгодное состояние. Если ядро устойчиво ко всем модам распада, §1.1.4, оно стабильно.

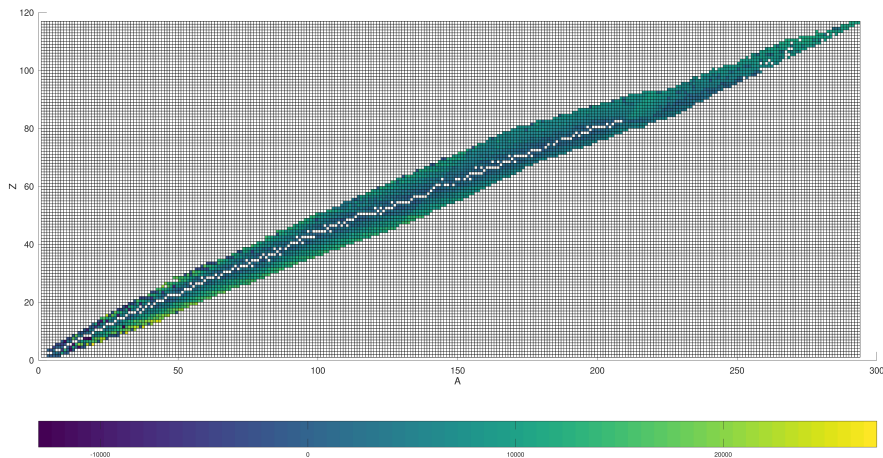


Рис. 1.17. График энергии всех видов распада

На рис. 1.17 приведен график энергии всех видов распада. На рис. 1.17 стабильным ядрам отвечает неокрашенная полоска внутри графика. Следует заметить, что рост энергии, высвобождаемой при распаде, очень быстрый по мере удаления от дорожки стабильности. На периферии «океана» изотопов значения достигают более 20 МэВ, что более чем в два раза превышает энергию связи на нуклон.

1.2.2 Стабильность атомных ядер по отношению к различным видам распадов

Рассмотрим теперь стабильность атомных ядер по отношению к различным видам распадов.

Периферию «океана» изотопов ограничивают распады с вылетом одной или нескольких составляющих ядра, протонов и нейтронов. На рис. 1.18 приведен график энергии протонных и нейтронных распадов.

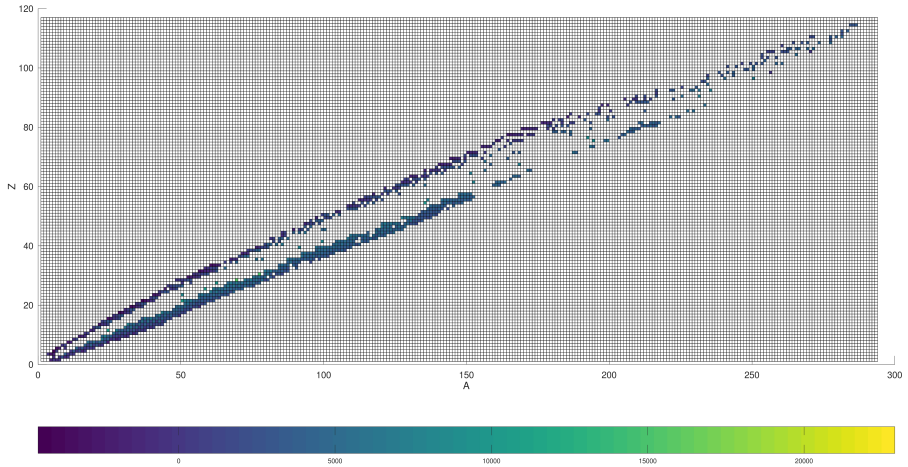


Рис. 1.18. График энергии протонных и нейтронных распадов

Наиболее ярко испускание протонов и нейтронов демонстрируют самые лёгкие ядра. Рассмотрим водород. Его изотопы с массой 4—7 распадаются с испусканием нейтронов.



Время протекания процессов (1.17)—(1.21) составляет 10^{-22} с. Такие времена характерны для *сильного взаимодействия*.

Рассмотрим теперь литий. Его изотопы с массой 3—5 распадаются с испусканием нейтронов.



Время протекания процессов (1.22)—(1.24) также имеет порядок 10^{-22}

с. Следует заметить, что распад изотопа ${}^5\text{Li}$ приводит к отсутствию ядер с атомным весом, равным 5.

Альфа-распад имеет место для нескольких изотопов самых лёгких и является доминирующим каналом распада для ядер тяжелее свинца.

На рис. 1.19 приведен график энергии альфа-распада

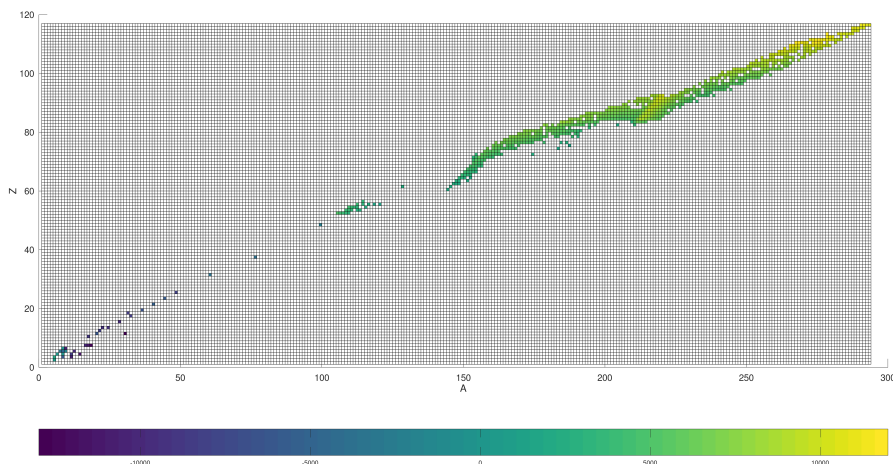


Рис. 1.19. График энергии альфа-распада

Рассмотрим случай бериллия.



Эта реакция приводит к отсутствию ядер с атомным весом, равным 8, аналогично случаю (1.24) для веса 5. Время протекания распада (1.25) имеет порядок 10^{-18} с.

Что касается тяжелых ядер, то наличие у них большого электрического заряда служит причиной их нестабильности. При этом как варианты распада, так и времена периодов полураспада разнятся колоссально, от 10^{-15} с, до возраста Вселенной.

Изотопы урана и тория, в силу колоссальных времён полураспада, по распространённости превышают редкие элементы, и присутствуют в земной коре в количестве порядка г/т. В §4.2 подробно рассмотрены цепочки ядерных реакций, имеющих начало в изотопах урана и тория и приводящих к образованию изотопов свинца.

Перейдём к рассмотрению «обычных» изотопов элементов.

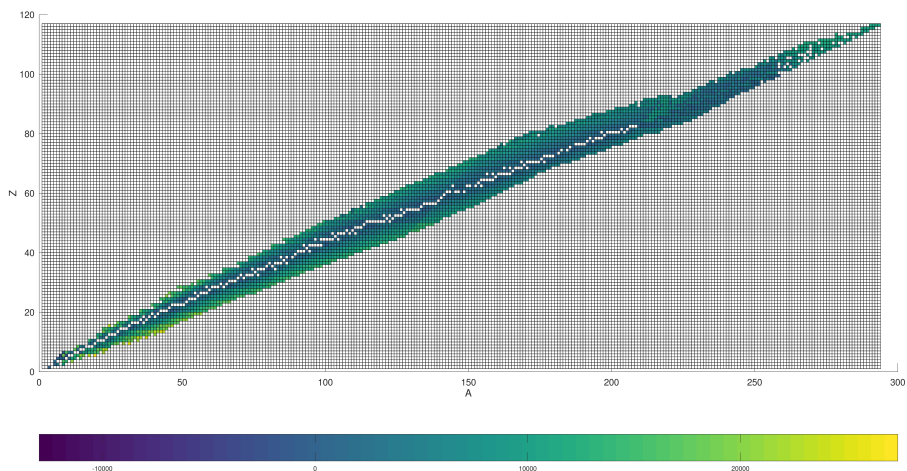


Рис. 1.20. График энергии бета-распада и электронной конверсии

На рис. 1.20 представлен совместный график энергии бета-распада Q_β и электронной конверсии Q_{EC} в координатах (заряд, массовое число). Данные приведены для положительных значений энергий возбуждений, то есть таких, которые переводят ядро в энергетически более выгодное состояние. Эти процессы являются в определённой мере антагонистичными, увеличивают или уменьшают заряд ядра и наиболее ярко проявляются для нейтро-избыточных и нейтрон-дефицитных конфигураций. В ряде случаев, они могут идти для одного и того же ядра.

Бета-распад и электронная конверсия (также позитронный распад) определяют в большинстве случаев, какие из изотопов химических элементов являются стабильными. По типу взаимодействия они относятся к *слабым взаимодействиям*. В зависимости от устройства ядер изотопов, разброс периодов полураспада составляет 10^{-15} с, до возраста Вселенной.

В §2.2 будут рассмотрены конкретные примеры для «несуществующих» на Земле элементов технеция и прометия. В §?? дана картина типологий устойчивости ядер для различного количества составляющих их нуклонов.

1.3 Ядерный нуклеосинтез

Для понимания распределений изотопов элементов в природе вообще, и на Земле в частности, необходимо иметь представление о том, как они образовывались. Наиболее полное современное издание по этому вопросу — книга В.П. Чечев, А.В. Иванчик, Д.А. Варшалович «Синтез элементов во Вселенной: От Большого взрыва до наших дней» [18], см. также учебник [20]. Краткое изложение вопроса содержится, например, в статье [19]. Будем далее использовать термин *распространённость изотопов*, ему синонимичен термин *обилие*.

По современным представлениям, Вселенная развивается согласно *стандартной космологической модели* (Большого взрыва). Согласно этой модели, более 15 млрд. лет назад началось и продолжается поныне расширение Вселенной из некоторого сверсжатого и сверхгорячего состояния.

На рис. 1.21 показано происхождение элементов из периодической таблицы Менделеева.



Рис. 1.21. Происхождение элементов
<https://en.wikipedia.org/wiki/Нуклеосинтез>

Как видно из рис. 1.21, синтез элементов весьма различен, и кроме того, одни и те же элементы могут иметь разное происхождение. На рис. 1.22 показаны реакции, которые могут идти в звёздах [17].

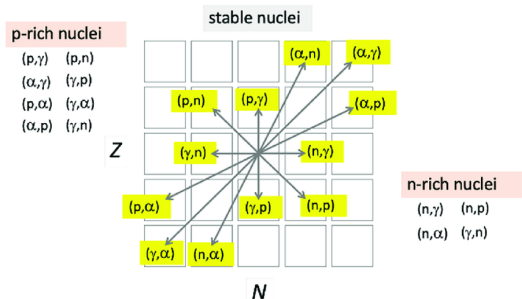


Рис. 1.22. Реакции, важные для нуклеосинтеза [17]



В ещё горячей Вселенной, а затем в звёздах лёгкие элементы и далее

того, что энергия связи становится меньше по мере утяжеления элементов.

Синтез более тяжёлых элементов идёт уже в реакциях захвата нейтронов ядрами. При этом образуются более тяжелые изотопы существующих ядер, в основном в процессах радиационного захвата нейтронов



а также ядра с бóльшим зарядом за счёт β -распада



При этом возможны и процессы распада получившихся ядер в зависимости от их стабильности по отношению к различным распадам, о чём говорилось в §1.2.

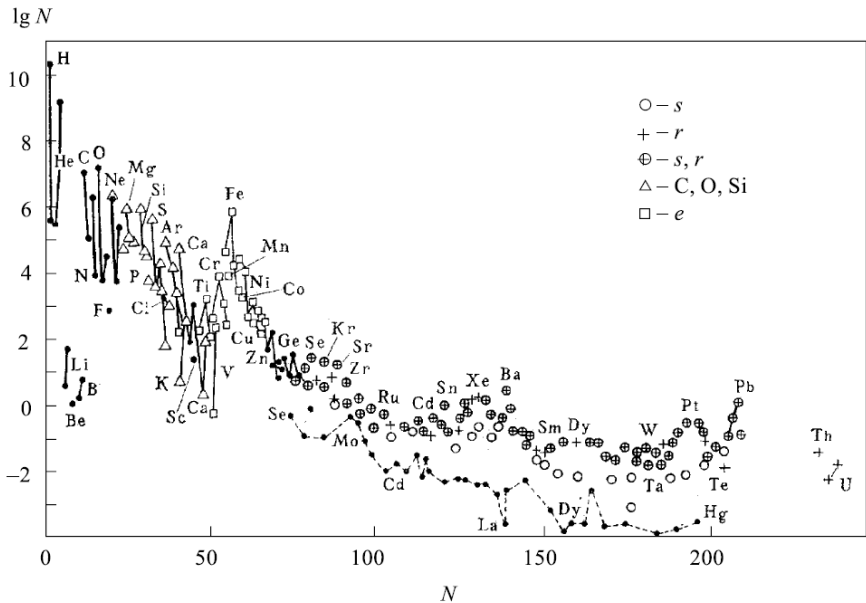


Рис. 1.23. Относительная распространенность нуклидов от атомной массы [19]
Обозначения указывают на различные процессы синтеза

На Рис. 1.23 представлена относительная распространенность нуклидов от атомной массы. Обозначения указывают на различные процессы синтеза, наиболее значимые из них мы рассмотрим далее.

Необходимо связать информацию о распространенности нуклидов из рис. 1.23 с закономерностями строения ядра §1.1. Рис. 1.23 отражает много информации. Для анализа общих закономерностей рассмотрим менее подробное представление распространенности нуклидов, показанное на Рис. 1.24.

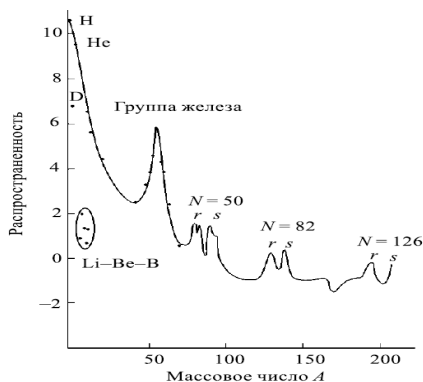


Рис. 1.24. Схематическое изображение распространенности нуклидов от атомной массы [19]

Распространённость элементов тяжелее гелия в целом экспоненциально снижается с ростом атомной массы A до 100 и после $A > 120$ практически постоянна. Наблюдается локальный максимум в области группы железа $Fe-Co-Ni$. Он отвечает максимальной энергии связи нуклонов в этих ядрах — см. рис. 1.7 из §1.1.2.

В дальнейшем ходе зависимости имеется 3 локальных двойных максимумов. Одни из элементов пар лежат в области магических нейтронных чисел $N = 50, 80, 126$ — см. ряд из формулы (1.5). Массы ядер при этом равны $A = 90, 138, 208$. Другие максимумы сдвинуты примерно на 10-15 массовых чисел. Эти особенности помечены буквами s и r , они будут рассмотрены в §1.3.1 и §1.3.2.

С точки зрения конечного состава планетного вещества важно понимать пути нуклеосинтеза тяжелых элементов и равновесное состояние на настоящее время. Общая схема образования элементов от железа до актинидов начинается с ядра железа.

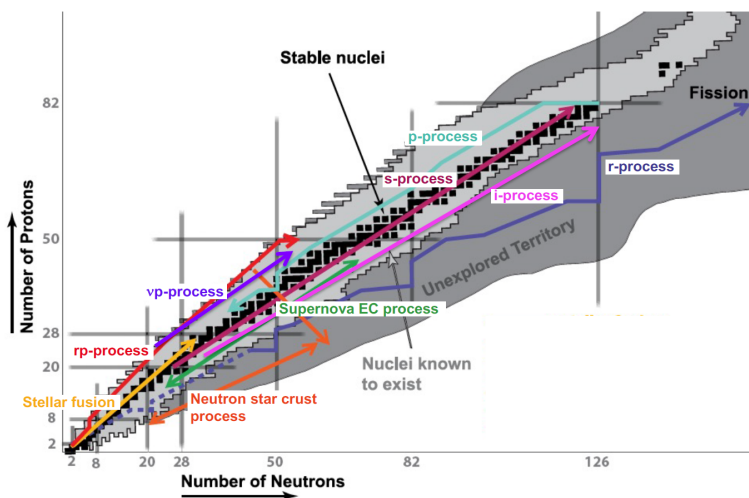


Рис. 1.25. Иллюстрация хода s - и r -процессов [24]

Возможны различные траектории (схемы) нуклеосинтеза. Наиболее интересна на первом шаге область стабильных элементов. При сопоставлении $N - Z$ диаграммы атомных ядер закладки «Периоды полураспада», рис. 1.3, с другими табличными данными, видно, что в области стабильных ядер максимальны и сечения захвата нейтронов.

На рис. 1.26 представлены различные процессы, важные для анализа путей нуклеосинтеза, в координатах (A, Z) . Жёлтым цветом даны изотопы, у которых имеется ненулевое сечение захвата нейтронов. Выше них показаны нестабильные изотопы, распадающиеся с захватом электрона, а ниже — нестабильные изотопы, распадающиеся с вылетом электрона.

При наличии потока нейтронов, в «жёлтых» изотопах происходит увеличение атомного веса A без изменения заряда Z и происходит движение на графике вправо. При электронном захвате уменьшается Z при постоянном значении A и происходит движение на графике вниз. При бета-распаде увеличивается Z при постоянном значении A и происходит движение на графике вверх. Тем самым идёт движение от малых величин A к большим за счёт захвата нейтронов, а процессы с электронами возвращают процесс в область стабильных ядер.

Таким образом, в первом приближении для понимания формиро-

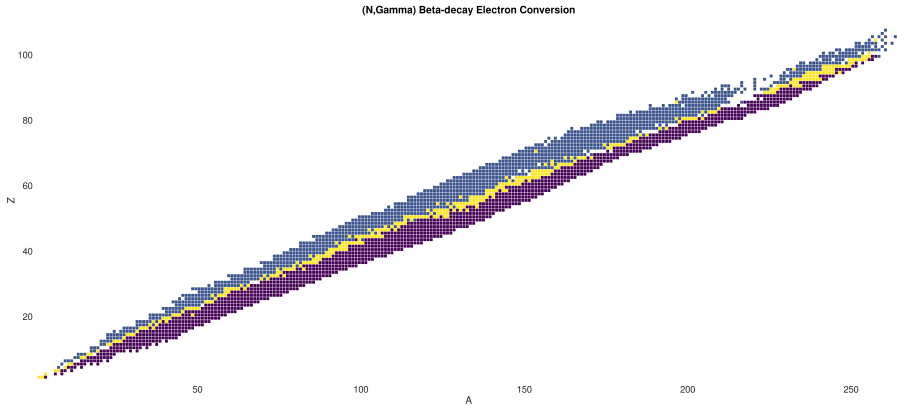


Рис. 1.26. Области (n, γ) , β^- , EC

вания ядер химических элементов, образующих планетное вещество, следует рассмотреть процесс нейтронного захвата.

1.3.1 Процесс медленного нейтронного захвата

Основными схемами нуклеосинтеза являются реакции медленного нейтронного захвата (s -процесс) и быстрого нейтронного захвата (r -процесс). Рассмотрим кратко эти схемы, следуя [18, 19].

По современным представлениям тяжёлые элементы образуются в реакциях захвата нейтронов. Обычно вероятность захвата нейтронов ядром имеет энергетическую зависимость

$$\sigma(E_n) \propto 1/\sqrt{(E_n)}. \quad (1.30)$$

При более высоких энергиях сечение может иметь более сложную зависимость, как показано на рис. 1.28.

В связи с типом зависимости (1.30), справочные данные обычно приводят для *тепловой энергии* нейтронов $T = 300$ К. Результатом захвата является изотоп с большим количеством нейтронов:

$$(A, Z) + n \longrightarrow (A + 1, Z) + \gamma. \quad (1.31)$$

Как правило, процесс (1.31) сопровождается испусканием γ -кванта, как в базовой ядерной реакции захвата нейтрона протоном (1.26).

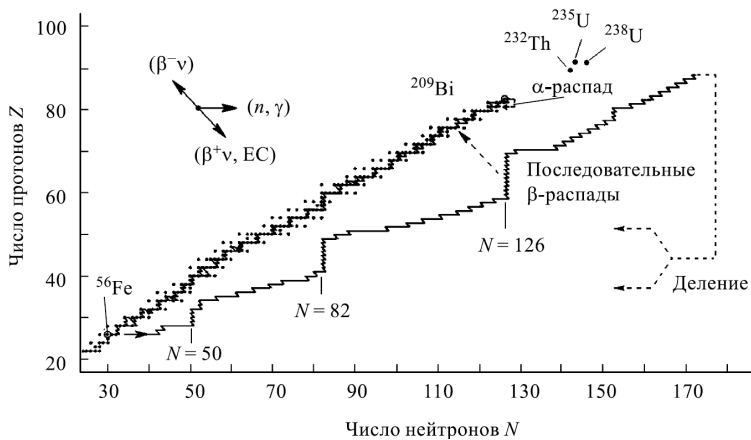


Рис. 1.27. Иллюстрация хода *s*- и *r*-процессов [19]

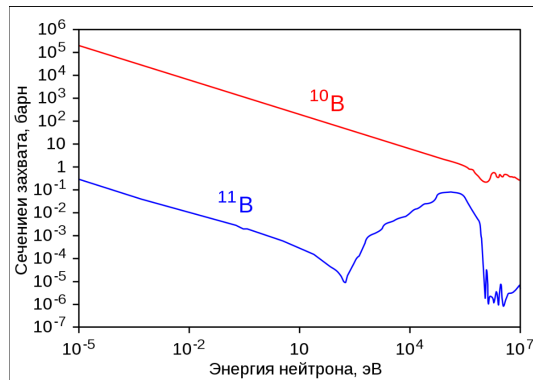


Рис. 1.28. Сечение захвата нейтрона изотопами бора — Википедия

На рис. 1.29 показаны табличные значения *сечений захвата* тепловых нейтронов в координатах (N, Z) . Термин сечение используется в ядерной физике для характеристики вероятности ядерных реакций. Единицей измерений служит 1 *барн*, который имеет размерность площади и равен

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2 = 100 \text{ фм}^2$$

— примерному размеру атомного ядра.

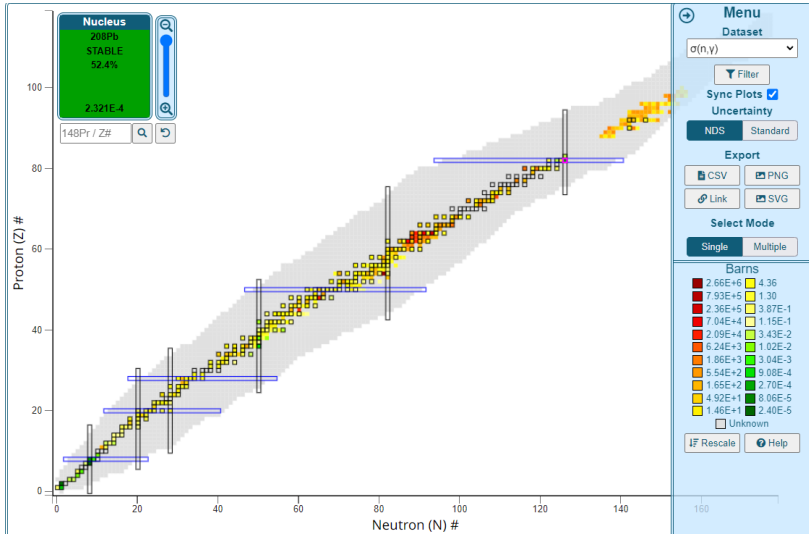


Рис. 1.29. Сечения захвата тепловых нейтронов

Стабильность дочернего изотопа $(A + 1, Z)$ определяется энергией по отношению к бета-распаду или захвату электрона, рассмотренной в §1.2.2.

Быстрый (r)- и медленный (s)-процессы захвата нейтронов (от английских слов rapid и slow) различаются отношением скорости захвата нейтронов (реакция (n, γ)) к скорости бета-распада. При условии

$$\frac{\tau_{\beta}}{\tau_{(n, \gamma)}} \ll 1 \quad (1.32)$$

в цепочку процессов образования тяжелых элементов будут вовлечены только стабильные и бета-радиоактивные ядра с большими периодами полураспада. То есть образование элементов будет происходить вдоль долины бета-стабильности. Нейтроны добавляются к ядрам последовательно. При этом могут образоваться только сравнительно устойчивые ядра. Ядра с малыми периодами полураспада исчезают раньше, чем они успевают захватить следующий нейтрон. Поэтому ясно, что образование тяжелых элементов должно заканчиваться свинцом и висмутом.

Теоретические оценки показывают, что для протекания s-процесса достаточно плотности нейтронов 10^{10} н/см³. В качестве исходных ядер, из которых в результате последовательного захвата нейтронов будут образовываться тяжелые элементы, можно выбрать ядра «железного пика». При плотности нейтронов 10^{10} н/см³ полное время облучения, необходимое для образования свинца из железа, составляет около 10^3 лет.

Рассмотрим последовательный процесс захвата нейтронов [20]

$$\dots \longrightarrow (A-1, Z) \longrightarrow (A, Z) \longrightarrow (A+1, Z) \longrightarrow \dots \quad (1.33)$$

Изменение числа $n(A)$ ядер с массовым числом A описывается уравнением:

$$\frac{dn(A)}{dt} = kn(A-1)\sigma_{n,\gamma}(A-1) - kn(A)\sigma_{n,\gamma}(A), \quad (1.34)$$

где k — поток нейтронов. Если процесс стационарный, то $\frac{dn(A)}{dt} = 0$. В таком случае из (1.34) получаем:

$$n(A-1)\sigma_{n,\gamma}(A-1) = n(A)\sigma_{n,\gamma}(A) = const. \quad (1.35)$$

Из соотношения (1.35) следует, что чем меньше сечение радиационного захвата нейтронов, тем больше должна быть распространенность элемента, образующегося в s-процессе. В частности, это объясняет почему ядра с магическими числами N и Z встречаются чаще. Связано это с тем, что для магических ядер величина сечения радиационного захвата нейтронов падает на порядок по сравнению с соседними немагическими.

На рис. 1.30 представлен график s-процессов после группы железа [22]. На нем присутствуют как процессы бета-распада, так и электронного захвата.

Данные, представленные на рис. 1.29, дают понимание того факта, что ядерный нуклеосинтез в «обычных» условиях завершается изотопами ^{208}Pb и ^{209}Bi . Сечение захвата нейтрона ядром ^{208}Pb на 3 порядка меньше, чем аналогичное сечение ^{207}Pb . Также сечение процесса с ^{209}Bi в 10 раз меньше, чем у ^{207}Pb . Даже если захват произойдет, следующие за висмутом элементы нестабильны по отношению к бета- и альфа-распаду, а сечения захвата нейтронов очень малы.

Завершение s-процесса в области изотопов свинца и висмута представлено на рис. 1.32

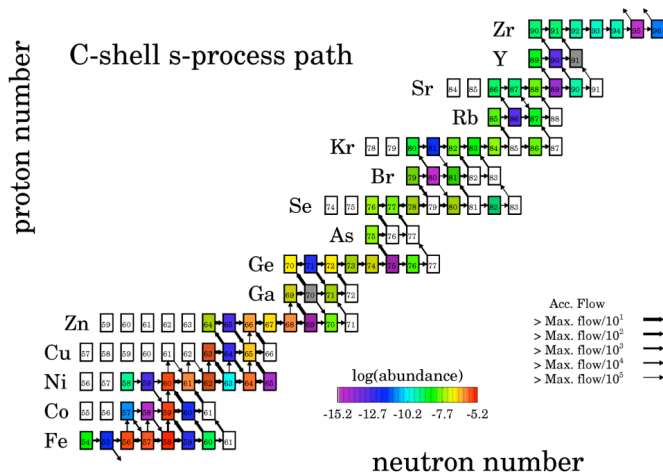


Рис. 1.30. s-процесс после группы железа [22]

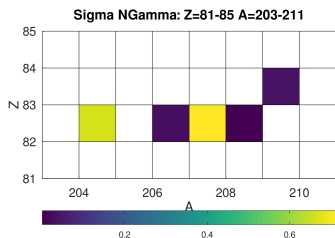


Рис. 1.31. Сечения захвата тепловых нейтронов для изотопов свинца и висмута

1.3.2 Процесс быстрого нейтронного захвата

В настоящее время общепризнанно, что многие ядра тяжелее железа, включая все ядра тяжелее ^{209}Bi , образуются в r -процессе путем быстрого последовательного захвата большого количества нейтронов. Главное условие такого сценария: скорость захвата нейтронов должна быть больше скорости бета-распада. Захват нейтронов происходит до тех пор, пока скорость реакции (n, γ) не станет меньше скорости

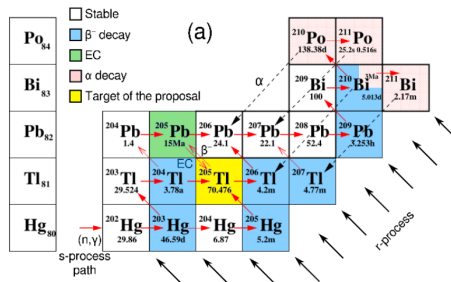


Рис. 1.32. Завершение s-процесса в области изотопов свинца и висмута [23]

распада изотопа

$$\frac{\tau_{\beta}}{\tau_{(n,\gamma)}} > 1 \quad (1.36)$$

Образующееся ядро распадается затем в результате бета-распада и вновь начинается последовательный захват нейтронов.

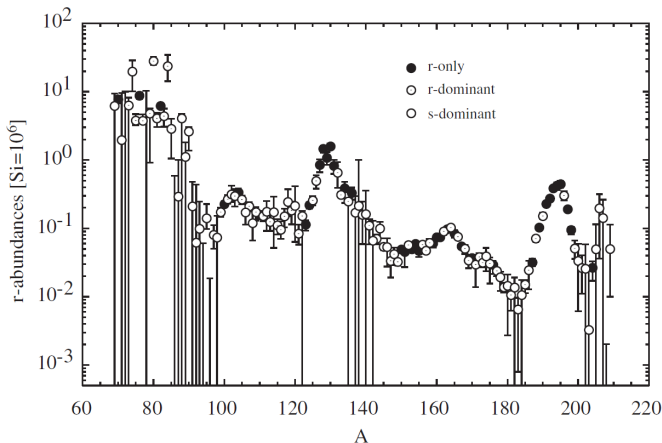


Рис. 1.33. Способы синтеза изотопов с указанием преобладания s- или r-процесса [21]

Линия, вдоль которой происходит образование ядер в r-процессе, смещена от дорожки стабильности (трека s-процесса) в направлении нейтроноизбыточных изотопов — Рис. 1.24.

На рис. 1.33 показаны способы синтеза изотопов с указанием преобладания s- или r-процесса. Наиболее сильные пики распространённости изотопов, образовавшихся по r-процессу, приходится на значения атомных весов s $A = 90$ (Se, Br и Kr), $A = 130$ (Te, I и Xe) and $A = 195$ (Os, Ir и Pt).

При промежуточных между быстрыми (r)- и медленными (s)-процессами имеется трасса, которая называется *промежуточными* (i- (intermediate) process) процессами.

1.4 Табличные данные по нуклеосинтезу

Приведём некоторые данные по нуклеосинтезу — Табл.4.1 в [18]. В дальнейшем будем сопоставлять эти данные с «Таблицей стандартных атомных весов 2021» табл. 3.5 §3.2.

I	Элемент
II	Массовое число A
III	Содержание нуклида в % по отношению к общему количеству элемента в настоящее время
IV	Процесс нуклеосинтеза
V	Распространённость нуклида (нормировано к $\text{Si} = 10^6$) в эпоху образования Солнечной системы

Таблица 1.3. Распространённость нуклидов в Солнечной системе
— Обозначения столбцов

Обозначения процессов нуклеосинтеза:

U	—	космологический синтез до образования звёзд
H	—	горение водорода
CNO	—	горение водорода при высоких температурах (CNO-цикл)
He	—	взрывное горение гелия
C	—	взрывное горение углерода
O	—	взрывное горение кислорода
Si	—	взрывное горение кремния
NSi	—	обогащённое нейтронами горение кремния
E	—	статическое ядерное равновесие
s	—	s-процесс. Продукты медленного захвата нейтронов
r	—	r-процесс. Продукты быстрого захвата нейтронов
p	—	p-процесс. Процессы на обеднённой нейтронами стороне долины β -стабильности
X	—	Дробление космическими лучами

В табл. 1.4 приведены данные о распространённости нуклидов первого периода Таблицы Менделеева, H и He.

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
H	1	99.9885		2.59×10^{10}
	2	0.0115	U	5.03×10^{15}
He	3	0.000134	U	1.03×10^6
	4	99.999866	H, U	2.51×10^9
	5			

Таблица 1.4. Распространённость нуклидов, H—He

Строка с атомным весом, равным 5, оставлена пустой.

В табл. 1.5 приведены данные о распространённости последних стабильных нуклидов Таблицы Менделеева и трансурановых элементов.

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Pb	204	1.4	s	0.066
	206	24.1	s, r	0.614
	207	22.1	s, r	0.680
	208	52.4	s, r	1.946
Bi	209	100	s, r	0.1382
Th	232	100	r	0.0440
U	234	0.0054	r	0.00000049
	235	0.7204	r	0.00058
	238	99.2742	r	0.0180

Таблица 1.5. Распространённость нуклидов в Солнечной системе, Pb—U

1.4.1 Графики данных по нуклеосинтезу

На рис. 1.34 представлены данные по всем типам нуклеосинтеза стабильных изотопов Таблицы Менделеева.

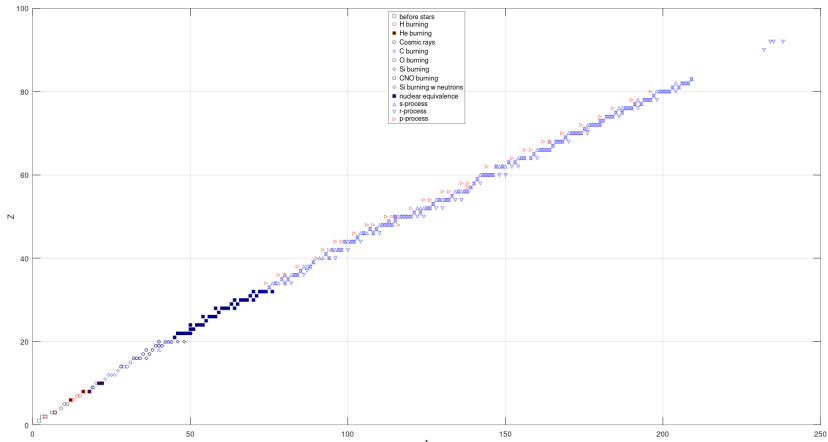


Рис. 1.34. Нуклеосинтез изотопов Таблицы Менделеева

Легкие элементы и группа стабильности На рис. 1.35 представлены данные по нуклеосинтезу стабильных изотопов лёгких элементов и группы стабильности.

Элементы тяжелее железа На рис. 1.36 представлены данные по типам нуклеосинтеза стабильных изотопов Таблицы Менделеева путем s-, r- и p-процессов.

Редкоземельные элементы На рис. 1.37 представлены данные по типам нуклеосинтеза стабильных изотопов редкоземельных элементов Таблицы Менделеева.

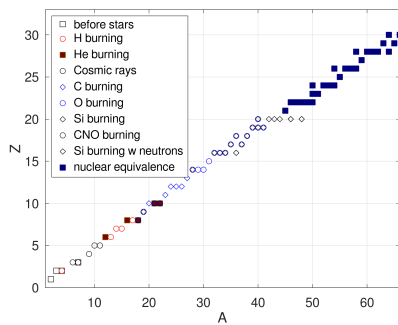


Рис. 1.35. Нуклеосинтез изотопов лёгких элементов и группы стабильности

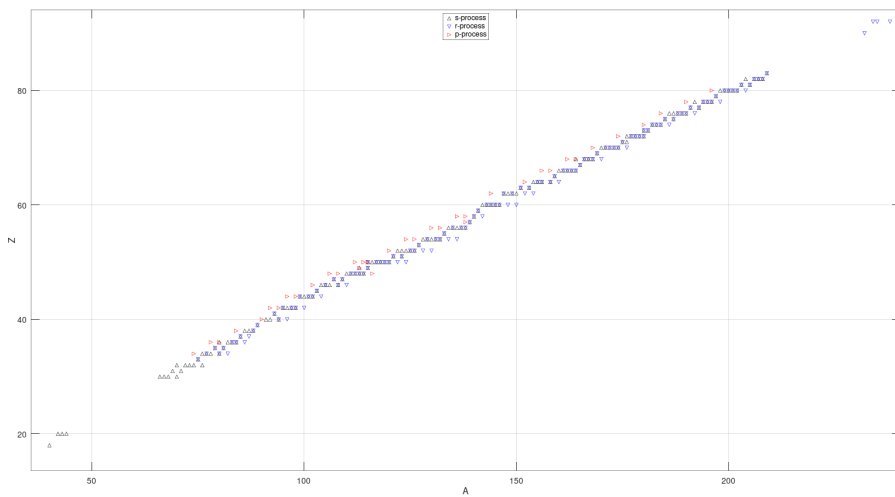


Рис. 1.36. Нуклеосинтез изотопов Таблицы Менделеева

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Li	6	7.59	X	4.2
	7	92.41	X, H, U	51.4
	8			
Be	9	100	X	0.612
B	10	19.9	X	3.7
	11	80.1	X	15.1
C	12	98.93	He	7.11×10^6
	13	1.07	H	7.99×10^4
N	14	99.636	H	2.12×10^6
	15	0.364	H	7.78×10^3
O	16	99.757	He	2.12×10^6
	17	0.038	H	5900
	18	0.205	He, CNO	3.15×10^4
F	19	100	CNO	804
Ne	20	90.48	C	3.06×10^6
	21	0.27	He, CNO	7330
	22	9.25	He, CNO	2.25×10^5
Na	23	100	C	5.77×10^4
Mg	24	78.99	C	8.10×10^5
	25	10.00	C	1.03×10^5
	26	11.01	C	1.13×10^5
Al	27	100	C	8.46×10^4
Si	28	92.223	O, Si	9.22×10^5
	29	4.685	O	4.68×10^4
	30	3.092	O	3.09×10^4
P	31	100	O	8300
S	32	94.99	O, Si	400258
	33	0.75	O, Si	3160
	34	4.25	O, Si	17800
	36	0.01	NSi (?)	72
	35	75.76	O, Si	3920
Cl	37	24.24	O, Si	1250
	36	0.3336	O, Si	78400
	38	0.0629	O, Si	14300
	40	99.6035	s	22

Таблица 1.6. Распространённость нуклидов, 2 период ТМ

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
K	39	93.2581	O, Si	3500
	40	0.0117	O, Si	6
	41	6.7302	O, Si	253
	40	96.94	O, Si	58500
	42	0.647	Si, s	391
	43	0.135	Si, s	82
	44	2.09	Si, s	1260
	46	0.004	NSi (?)	2
Ca	48	0.187	NSi (?)	113
	45	100	Si, E	34.4
Sc	70	20.57	E, s	24.3
	72	27.45	E, s	31.7
	73	7.75	E, s	8.8
	74	36.50	E, s	41.2
	76	7.73	E, s	8.5
	75	100	s, r	6.10
As	74	0.89	p	0.60
	76	9.37	s	6.32
Se	77	7.63	s, r	5.15
	78	23.77	s	16.04
	80	49.61	s, r	33.48
	82	8.73	r	5.89
	79	50.69	s, r	5.43
	81	49.31	s, r	5.28
Br	78	0.335	p	0.20
	80	2.286	s, p	1.30
Kr	82	11.593	s	6.51
	83	11.500	s, r	6.45
	84	59.987	s, r	31.78
	86	17.729	r	9.61

Таблица 1.7. Распространённость нуклидов, 3 период

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Ti	46	8.25	E	204
	47	7.44	E	184
	48	73.72	E	1820
	49	5.41	E	134
	50	5.18	E, NSi (?)	128
V	50	0.250	E	0.7
	51	99.750	E	285.7
Cr	50	4.35	E	569
	52	83.789	E	11000
	53	9.501	E	1240
	54	2.365	E	309
Mn	55	75.76	E	9220
Fe	54	5.845	E	49600
	56	91.754	E	7.78×10^5
	57	2.119	E	18000
	58	0.282	E	2390
Co	59	100	E	2350
Ni	58	68.077	E	33400
	60	26.233	E	12900
	61	1.1399	E	559
	62	3.6346	E	1780
Cu	64	0.9255	E	454
	63	69.15	E	374
	65	30.85	E	167
Zn	64	49.17	E	630
	66	27.13	E, s	362
	67	4.04	E, s	53
	68	18.45	E, s	243
Ga	70	0.61	E, s	8
	69	60.108	E, s	22.0
	71	39.892	E, s	14.6

Таблица 1.8. Распространённость нуклидов в Солнечной системе,
группа железа

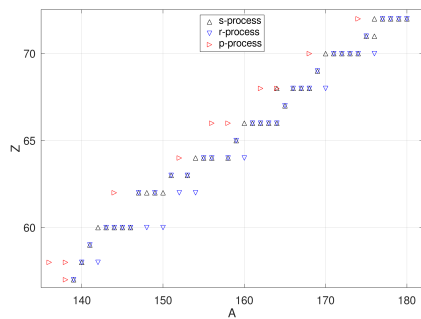


Рис. 1.37. Нуклеосинтез изотопов редкоземельных элементов
Таблицы Менделеева

Глава 2

Изотопы на Земле и других планетах

Элементный состав небесного тела существенно различен для разных *оболочек планеты*.

В *Солнечной системе* выделяют различные группы планет. В частности, *планеты земной группы* — четыре планеты Солнечной системы: Меркурий, Венера, Земля и Марс.

Различают три наружных оболочки Земли: *литосферу*, *гидросферу* и *атмосферу*.

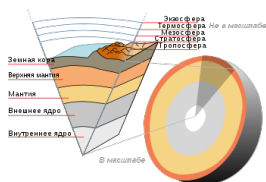


Рис. 2.1. Строение планеты Земля — Википедия

Под литосферой понимают верхний твердый покров планеты, который служит ложем океана, а на материках совпадает с сушей.

Гидросфера — это все виды химически не связанной воды в твердом, жидком и газообразном состоянии. В состав гидросферы входят воды Мирового океана, подземные воды, воды рек, озер, болот, морей,

ледников и других криогенных образований. Мировой океан покрывает 71% поверхности Земли, его средняя глубина 3900 м [44].

Современная *атмосфера Земли*, составляющая менее одной миллионной доли массы планеты, содержит примерно 78% азота, 20% кислорода, 1% инертных газов, 0.03% углекислого газа и незначительное количество других газов.

Все планеты земной группы Солнечной системы имеют следующее строение литосферы:

- В центре планеты находится *ядро* из железа с примесью никеля.
- *Мантия* — промежуточный слой литосферы. Она образуется в результате отделения от первичного планетного вещества металлической части, которая уходит в ядро, и плавления, продукты которого формируют кору планеты. Мантия состоит из различных силикатов.
- *Кора* — внешняя оболочка планеты, образовавшаяся в результате частичного плавления мантии и состоящая также из силикатных пород, но обогащённая другими элементами.

Проблематика изотопной планетологии кратко рассмотрена в §2.6.2, см. также учебное пособие [44].

2.1 Общие сведения о распространённости элементов и изотопов в земной коре

Рассмотрим *земную кору* как наиболее важную для человечества оболочку планеты.

Земную кору составляет сравнительно небольшое число элементов. Около 50% массы земной коры приходится на кислород, более 25 % — на кремний. Всего 18 элементов: O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, H, Ti, C, Cl, P, S, N, Mn, F, Ba — составляют 99,8 % массы земной коры.

На рис. 2.2 представлены данные по распространённости химических элементов в коре Земли по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>.

Как видно из рис. 2.2, имеет место колоссальная неравномерность распространённости химических элементов в коре Земли. Ввиду этого они представлены в логарифмическом масштабе.

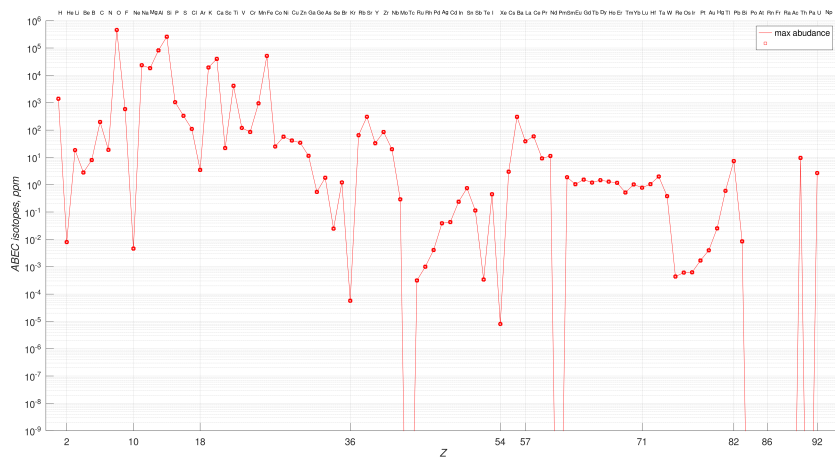


Рис. 2.2. Распространённость химических элементов в коре Земли
По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

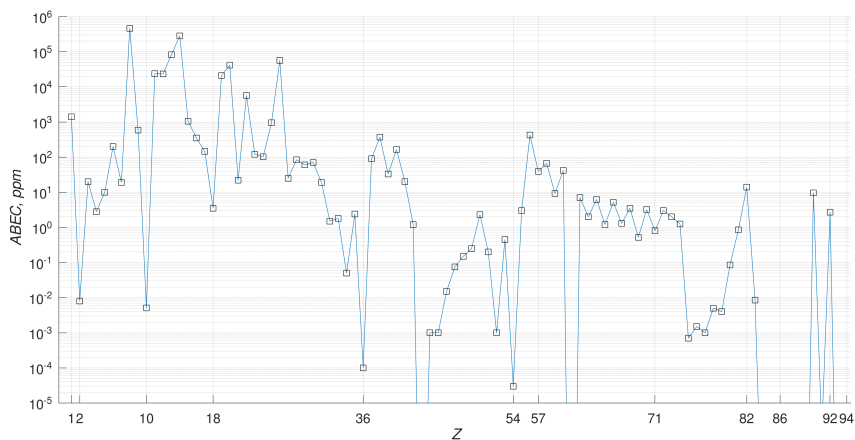


Рис. 2.3. Распространённость химических элементов в коре Земли,
превышающая 10 ppm
По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

Для лучшей иллюстрации На рис. 2.3 представлены данные по распространённости химических элементов, превышающая 10 ppm (относительная величина 10^{-5} при распространённости кремния, равной 10^5).

Принято условно выделять несколько групп элементов по их распространённости, а также исторически сложившиеся названия. *Горные породы* формируют H, C, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe. Как можно заметить, большая часть из них находится в первых периодах таблицы Менделеева.

Противоположную позицию *редких элементов* в основном занимают *благородные металлы*: Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au, а также Te и Re.

Вопреки своему названию, *редкоземельные элементы*: Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, не являются столь уж редкими. Как правило, редкоземельные элементы встречаются в природе совместно. Суммарное содержание редкоземельных элементов составляет более 100 г/т.

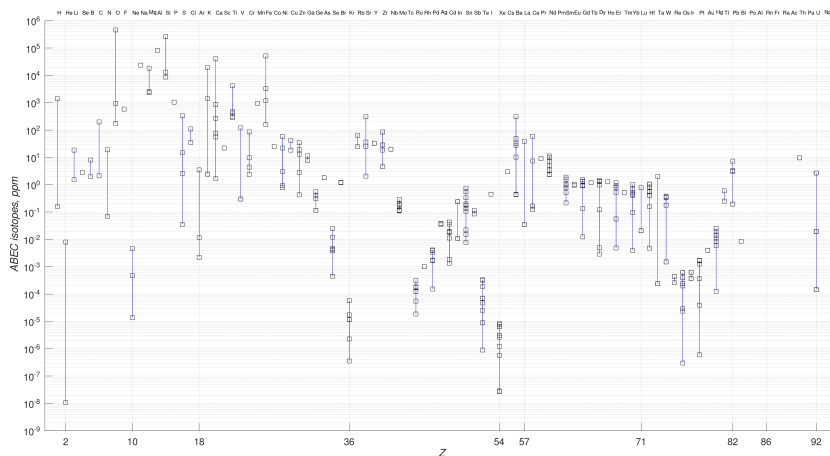


Рис. 2.4. Распространённость изотопов химических элементов в коре Земли

По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

Распределение изотопов химических элементов в земной коре весь-

ма разнообразно. Для конкретного химического элемента содержание различных изотопов может отличаться на несколько порядков.

На рис. 2.4 представлены данные по распространённости изотопов химических элементов в коре Земли по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>.

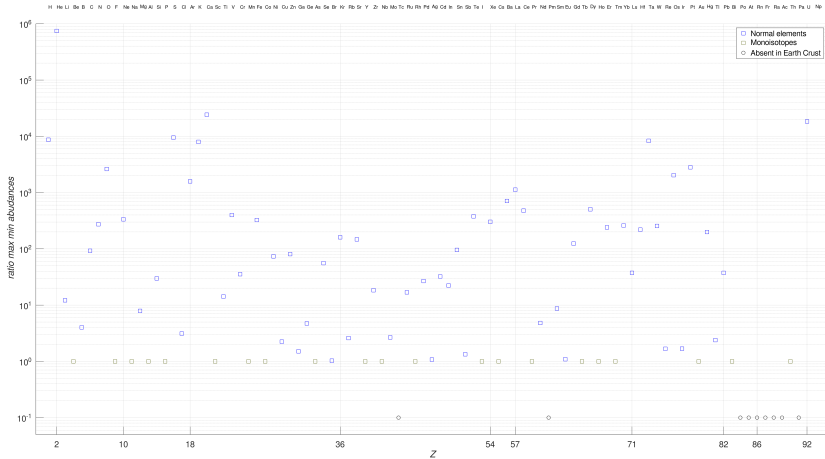


Рис. 2.5. Отношение распространённости изотопов химических элементов в коре Земли
По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

На рис. 2.5 представлены данные по отношениям распространённости изотопов (максимальной к минимальной) химических элементов в коре Земли по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>. Отдельно выделены элементы-моноизотопы и элементы, отсутствующие в коре Земли.

Важную информацию о распространённости изотопов дают данные об их нуклеосинтезе — §1.4. На рис. 2.6 представлены данные по распространённости изотопов химических элементов в коре Земли по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>. Также на легенде данных указаны типы происхождения всех изотопов. Изучение данных рис. 2.6 даёт богатую информацию как об абсолютных величинах распространённости различных элементов, так и об соотношениях распространённости их изотопов.

Например, можно заметить, что изотопы, возникшие в результате р-процессов, как правило имеют существенно более низкую распространённость.

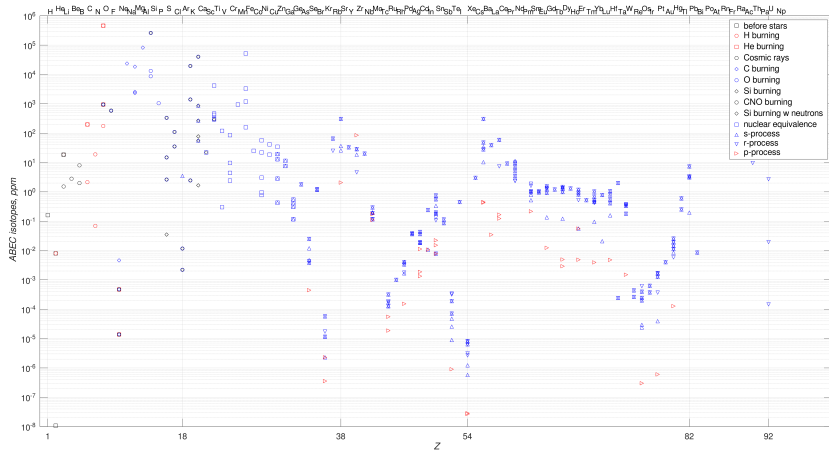


Рис. 2.6. Распространённость изотопов химических элементов в коре Земли

По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

Лёгкие элементы. Рассмотрим три первых периода таблицы Менделеева, с зарядами от 1 (H) до 2 (He), с 3 (Li) до 10 (Ne) и с 11 (Na) до 18 (Ar).

На рис. 2.7 представлены относительные распространённости изотопов химических элементов $Z=1—18$ в коре Земли.

Максимальная высота столбика соответствует 100% относительной распространённости изотопа. Такую или практически такую высоту имеют изотопы ^1H , ^4He , ^9Be , ^{19}F , ^{40}Ar .

Тяжёлые элементы. На рис. 2.8 представлены относительные распространённости изотопов химических элементов $Z=55—92$ в коре Земли.

Для тяжёлых элементов доминирование отдельных изотопов редко.

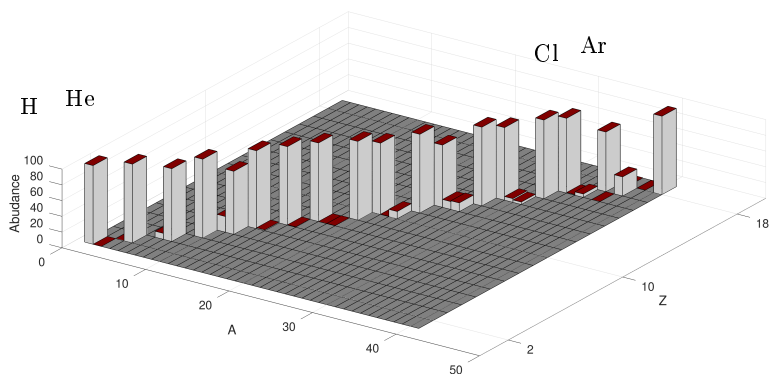


Рис. 2.7. Относительные распространённости изотопов химических элементов $Z=1-18$ в коре Земли

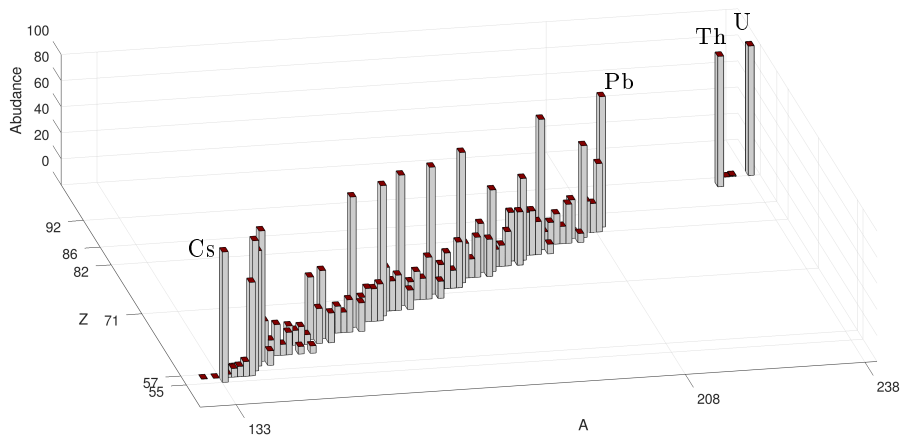


Рис. 2.8. Относительные распространённости изотопов химических элементов $Z=55-92$ в коре Земли

2.2 Редкие элементы

В табл. 1.2 приведены данные о количестве стабильных элементов для различных химических элементов. В первом горизонтальном блоке сгруппированы элементы, имеющие только один стабильный изотоп. Всего их 24, что составляет весьма небольшую долю общего количества элементов.

Как показано на рис. 1.14, моноизотопные элементы в ряде химических элементов не встречаются один за другим, и всегда соседствуют с немонаизотопными элементами.

2.2.1 «Отсутствующие» элементы

Интересно разобраться в деталях этой закономерности. Наиболее ярко эффект выражен для двух элементов, вообще не вошедших в табл. 1.2. Это технеций Tc и прометий Pm, все изотопы которых представлены на Земле только в следовых количествах. В связи с этим в таблице Менделеева не приводятся их массы.

В §1.1.3 приводится эмпирическое правило Шукарева—Маттауха о невозможности одновременного существования стабильных изобар, заряды ядер которых отличаются на единицу. Обсудим примеры, которые часто приводят для его иллюстрации.

Случай технеция. Элемент технеций был открыт достаточно поздно (в 1937 году), в сравнении с окружающими его молибденом и рутением.

Технеций был получен путем облучения молибдена нейтронами (технические подробности — [10]). В дальнейшем, технеций был обнаружен в спектрах звезд и осколках деления урана [11].

По правилу Шукарева-Маттауха, так как молибден и рутений имеют стабильные изотопы с массовыми числами 92, 94, 95, 96, 97, 98, 100 и 96, 98, 99, 100, 101, 102, 104, стабильный технеций (и его изотопы), не могут существовать. На рис. 2.9 представлен фрагмент таблицы Менделеева IUPAC.

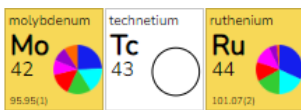


Рис. 2.9. Изотопы Tc, Mo и Ru
— <https://applets.kcvs.ca/IPTEI/IPTEI.html/>

Однако, справедливости ради стоит отметить, что «стабильное ядро» понятие условное, и стабильность ядра зависит от того, какой период полураспада мы будем считать достаточно длительным. На Рис. 1.3 стабильными считаются ядра с периодом полураспада $T_{1/2} > 3 \cdot 10^{24}$ лет.

97Ru 2.83 d $\epsilon = 100.00\%$	98Ru STABLE 1.87%	99Ru STABLE 12.76%	100Ru STABLE 12.60%	101Ru STABLE 17.06%	102Ru STABLE 31.55%
96Tc 4.28 d $\epsilon = 100.00\%$	97Tc 4.21E+6 y $\epsilon = 100.00\%$	98Tc 4.2E+6 y $\beta^- = 100.00\%$	99Tc 2.111E+5 y $\beta^- = 100.00\%$	100Tc 15.46 s $\beta^- = 100.00\%$ $\epsilon = 2.6E-3\%$	101Tc 14.02 min $\beta^- = 100.00\%$
95Mo STABLE 15.64%	96Mo STABLE 16.67%	97Mo STABLE 9.60%	98Mo STABLE 24.39%	99Mo 65.976 h $\beta^- = 100.00\%$	100Mo 7.3E+18 y 9.83% $2\beta^- = 100.00\%$

Рис. 2.10. Стабильные изотопы Мо и Ru — чёрные квадраты
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

Период полураспада относительно долгоживущих изотопов технеция ($A=97-99$) составляет $(0.2 - 4.2) \cdot 10^6$ лет, что действительно мало, в сравнении с временем жизни протона, но вполне достаточно для его подробного изучения. В настоящее время технеций в больших количествах образуется в реакторах, как продукт деления урана.

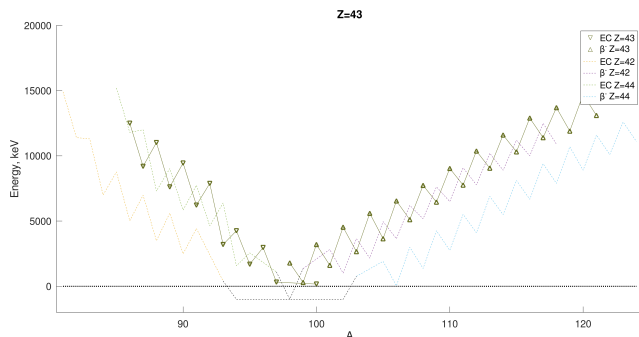


Рис. 2.11. Графики энергий бета-распада и электронной конверсии
для изотопов Tc, Mo и Ru
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>.

На рис. 2.11 приведены графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов технеция с электрическим зарядом ядра $Z = 43$ и его ближайших соседей, молибдена $Z = 42$ и рутения $Z = 44$.

Для изотопов каждого элемента приведены две ветви энергий: для Q_β бета-распада и электронной конверсии Q_{EC} из данных <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>. Они даны соответственно значками

∇ , что соответствует уменьшению заряда ядра изотопа, и Δ в случае увеличения заряда. Пунктирной линией показан уровень нуля энергии. В случае наличия стабильных изотопов, им формально присвоено значение энергии -1000 кэВ.

На стыке ветвей Q_β и Q_{EC} возможно существование стабильных изотопов. Наименьшие энергии распадов имеют изотопы технеция с числом нуклонов A , равным 97-99. Однако для всех изотопов технеция положительны энергии или Q_β бета-распада, или электронной конверсии Q_{EC} . Для изотопа ^{99}Tc энергия Q_β отрицательна, но положительна Q_{EC} . В то же время у молибдена и рутения есть стабильные изотопы в диапазоне A от 95 до 102.

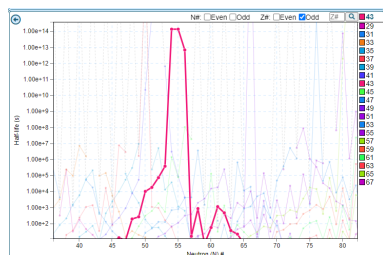


Рис. 2.12. Периоды полураспада изотопов Tc
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

На рис. 2.12 приведены графики периодов полураспада изотопов технеция. Видно, что времена жизни изотопов с A , равным 97-99 весьма велики. Однако у молибдена и рутения они существенно больше, что при малом генезисе изотопов технеция приводит к их изъятию из коры Земли на геологических масштабах времени.

Возвращаясь к правилу Щукарева-Маттауха, можно предложить иллюстрацию рис. 2.13 «покрытия» изотопами молибдена и рутения всех вакантных мест для стабильных изотопов технеция. Получается, что в окрестности наиболее энергетически выгодных конфигураций изотопов технеция имеются еще более выгодные конфигурации элементов-соседей. Подробности можно найти в публикации [11].

Случай прометия. Другим примером «отсутствующего в природе» элемента является прометий. В отличие от технеция, этот элемент не только слабо представлен в земной коре, но и имеет весьма малые времена полураспада.

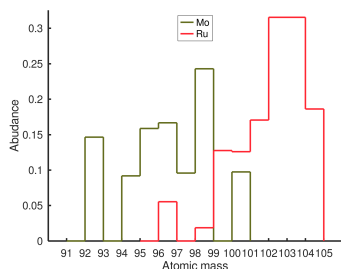


Рис. 2.13. Распространенность изотопов молибдена и рутения
— данные <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

На рис. 2.14 представлен фрагмент таблицы Менделеева IUPAC. Как и в случае технеция, элементы с электрическим зарядом $Z = Z(Pm) \pm 1$ имеют по несколько стабильных изотопов.



Рис. 2.14. Изотопы Nd, Pm и Sm
— <https://applets.kcvs.ca/IPTEI/IPTEI.html/>

На рис. 2.15 представлен фрагмент NZ -диаграммы. Черными квадратами показаны стабильные изотопы неодима $Z = 60$ и самария $Z = 62$.

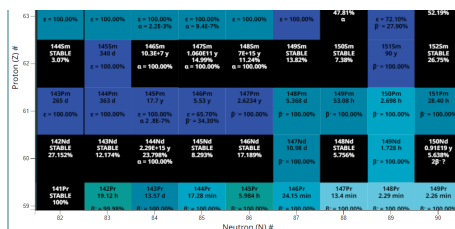


Рис. 2.15. Стабильные изотопы Nd, Pm и Sm — чёрные квадраты
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

Обратимся к численным данным.

На рис. 2.16 приведены графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов прометия с электрическим зарядом ядра $Z = 61$ и его ближайших соседей, неодима $Z = 60$ и самария $Z = 62$.

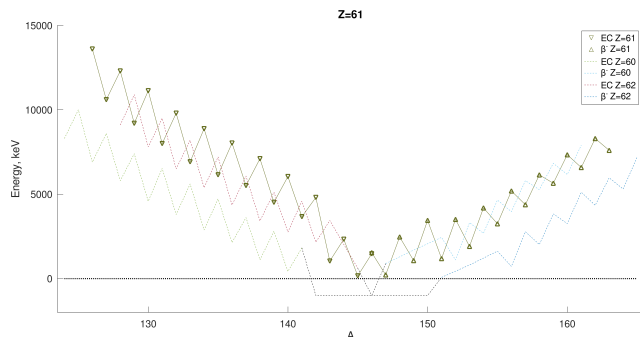


Рис. 2.16. Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Pm, Nd и Sm
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

Пунктирной линией показан уровень нуля энергии. В случае наличия стабильных изотопов, им формально присвоено значение энергии -1000 кэВ. На стыке ветвей Q_β и Q_{EC} возможно существование стабильных изотопов. Наименьшие энергии распадов имеют изотопы прометия с числом нуклонов A , равным 145 и 147. Однако для всех изотопов технеция положительны энергии как Q_β бета-распада, так и электронной конверсии Q_{EC} . В то же время у неодима и самария есть стабильные изотопы в диапазоне A от 142 до 150.

На рис. 2.17 приведён график периода полураспада изотопов Pm для его различных изотопов.

2.3 Элементы — моноизотопы

Рассмотрим теперь элементы — моноизотопы. В табл. 2.1 приведён первый блок табл. 1.2.

Всего имеется 24 элемента—моноизотопа. Рассмотрим несколько примеров, подобно тому как это сделано в §2.2.

В §3 «Периодическая таблица элементов и изотопов» на рис. 3.1 представлена таблица Менделеева элементов и изотопов [46]

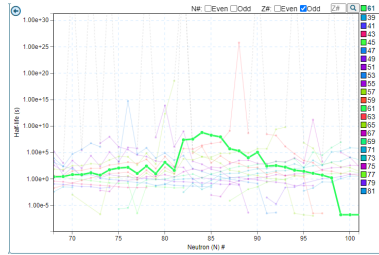


Рис. 2.17. Периоды полураспада изотопов Pm
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

Число стабильных изотопов, k	Элементы, ${}_Z E^{N_1, N_2, \dots, N_k}$, z — заряд ядра, N_j — атомный вес изотопа j	Число элементов	Общее число изотопов
1	${}_4 Be^9$, ${}_9 F^{19}$, ${}_{11} Na^{23}$, ${}_{13} Al^{27}$, ${}_{15} P^{31}$, ${}_{21} Sc^{45}$, ${}_{23} V^{51}$, ${}_{25} Mn^{55}$, ${}_{27} Co^{59}$, ${}_{33} As^{75}$, ${}_{39} Y^{89}$, ${}_{41} Nb^{93}$, ${}_{45} Rh^{103}$, ${}_{53} I^{127}$, ${}_{55} Cs^{133}$, ${}_{57} La^{139}$, ${}_{59} Pr^{141}$, ${}_{65} Tb^{159}$, ${}_{67} Ho^{165}$, ${}_{69} Tm^{169}$, ${}_{71} Lu^{175}$, ${}_{75} Ta^{181}$, ${}_{79} Au^{197}$, ${}_{83} Bi^{209}$	24	24

Таблица 2.1. Стабильные элементы — моноизотопы.
Часть табл. 1.2

2.3.1 Случай бериллия.

Бериллий — наиболее легкий химический элемент с одним стабильным изотопом. Известны 12 изотопов бериллия, от Be^5 и Be^{16} .

Единственным стабильным изотопом является Be^9 , его природная изотопная распространённость равна 100 %. Таким образом, бериллий практически моноизотопный элемент. Также в следовых количествах присутствуют Be^7 и Be^{10} , возникающие в атмосфере в результате ядерных реакций, индуцированных космическим излучением. Самым долгоживущим радиоизотопом является Be^{10} с периодом полураспада 1.387 млн лет.

Ближайшими к бериллию элементами являются литий и бор. Они имеют по 2 стабильных изотопа.

2.3.2 Случай фтора.

Фтор — второй после бериллия химический элемент с одним стабильным изотопом.

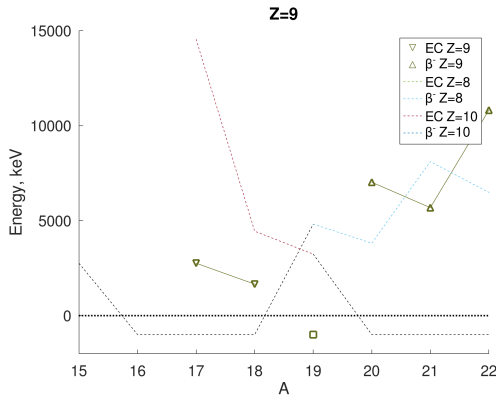


Рис. 2.18. Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов O, F и Ne
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

Известны изотопы фтора с массовыми числами от 14 до 31 и 2 ядерных изомера. Единственным стабильным изотопом фтора является F^{19} , его природная изотопная распространённость равна 100 %. Самым долгоживущим радиоизотопом является F^{18} с периодом полураспада 110 минут.

Ближайшими к фтору элементами являются кислород и неон. Они имеют по 3 стабильных изотопа.

На рис. 2.18 приведены графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов O, F и Ne. Все изотопы фтора, кроме F^{19} , неустойчивы по отношению к бета-распаду или электронной конверсии. При этом кислород и неон имеют стабильные изотопы с атомными массами 16-18 и 20-22 соответственно.

2.4 Элементы с двумя стабильными изотопами

Вернемся к рис. 1.14 и табл. 1.2. Подробнее рассмотрим элементы с двумя стабильными изотопами.

На Земле имеются 19 элементов с двумя стабильными изотопами. Они приведены в табл. 2.2, которая представляет второй блок табл. 1.2.

Число стабильных изотопов, k	Элементы, ${}_Z E^{N_1, N_2, \dots, N_k}$, z — заряд ядра, N_j — атомный вес изотопа j	Число элементов	Общее число изотопов
2	${}_1 H^{1,2}$, ${}_2 He^{3,4}$, ${}_3 Li^{6,7}$, ${}_5 B^{10,11}$, ${}_6 C^{12,13}$, ${}_7 N^{14,15}$, ${}_{17} Cl^{35,37}$, ${}_{19} K^{39,41}$, ${}_{29} Cu^{63,65}$, ${}_{31} Ga^{69,71}$, ${}_{35} Br^{79,81}$, ${}_{37} Rb^{85,87}$, ${}_{47} Ag^{107,109}$, ${}_{49} In^{113,115}$, ${}_{63} Eu^{151,153}$, ${}_{76} Re^{185,187}$, ${}_{77} Ir^{191,193}$, ${}_{81} Tl^{203,205}$	19	38

Таблица 2.2. Элементы с двумя стабильными изотопами.

Часть табл. 1.2

Эти элементы можно разделить на две группы. К первой относятся элементы с изотопами имеющими две смежные по порядку атомные массы: ${}_1 H^{1,2}$, ${}_2 He^{3,4}$, ${}_3 Li^{6,7}$, ${}_5 B^{10,11}$, ${}_6 C^{12,13}$, ${}_7 N^{14,15}$, ${}_{19} K^{39,41}$.

В табл. 2.3 представлены элементы этой группы.

В этой группе исключительное положение занимает калий. По группированию стабильных изотопов он принадлежит к другой группе, в табл. 2.4, поскольку атомный веса его стабильных изотопов отличается на 2. При этом минорный изотоп имеет имеет распространённость всего 6,73%. Далее этот случай будет рассмотрен в параграфе про производство аргона §4.1.

Во вторую группу входят элементы с массой изотопов, отличающимися на 2: ${}_{17} Cl^{35,37}$, $({}_{19} K^{39,41})$, ${}_{29} Cu^{63,65}$, ${}_{31} Ga^{69,71}$, ${}_{35} Br^{79,81}$, ${}_{37} Rb^{85,87}$, ${}_{47} Ag^{107,109}$, ${}_{49} In^{113,115}$, ${}_{63} Eu^{151,153}$, ${}_{76} Re^{185,187}$, ${}_{77} Ir^{191,193}$, ${}_{81} Tl^{203,205}$.

Для первой группы характерно доминирование распространённости одного из изотопов. Во второй группе мажорный и минорный изотопы имеют сопоставимые величины распространённости.

На рис. 2.21 представлена часть рис. 2.5 на котором выделены элементы, имеющих 2 изотопа. Синим цветом выделены данные по элементам первой группы, состоящей из лёгких элементов. Их изотопы имеют последовательные значения атомных номеров (электрических

Элемент	z,n	Изотопная распространённость на Земле, %
Водород	1, 1	99,98
	1, 2	0,02
Гелий	2, 1	0,00001
	2, 2	99,99999
Литий	3, 3	7,9
	3, 4	92,1
Бор	5, 5	18,8
	5, 6	81,2
Углерод	6, 6	98,9
	6, 7	1,1
Азот	7, 7	99,62
	7, 8	0,38
Калий	19, 39	93,258
	19, 41	6,730

Таблица 2.3. Элементы с двумя стабильными изотопами.
Элементы с существенно разной распространённостью изотопов

Элемент	z, A	Изотопная распространённость на Земле, %
Хлор	17, 35	75,78
	17, 37	24,22
Медь	29, 63	69,1
	29, 65	30,9
Галлий	31, 69	60,11
	31, 71	39,89
Бром	35, 79	50,56
	35, 81	49,44
Сурьма	51, 121	57,36
	51, 123	42,64
Европий	63, 151	52,2
	63, 153	47,8
Иридий	77, 191	37,3
	77, 193	62,7
Таллий	81, 203	29,52
	81, 205	70,48

Таблица 2.4. Элементы с двумя стабильными изотопами.
Элементы с сопоставимой распространённостью изотопов

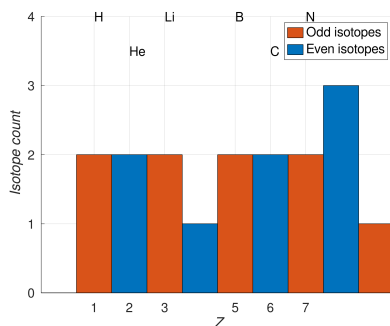


Рис. 2.19. Элементы с двумя стабильными изотопами
Часть рис. 1.14

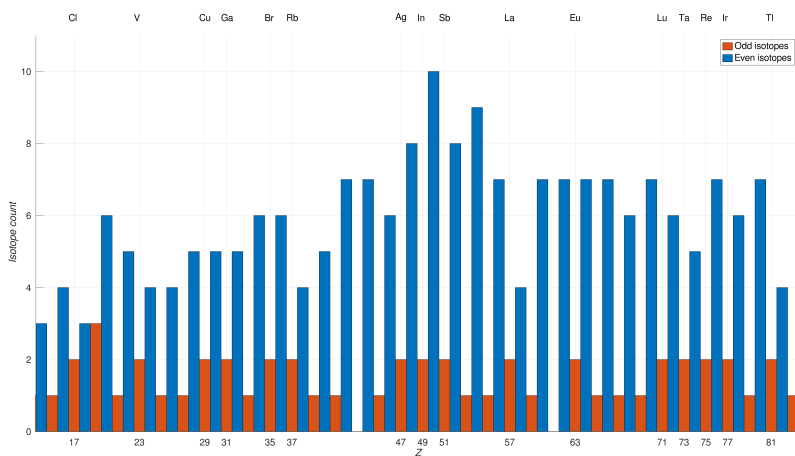


Рис. 2.20. Элементы с двумя стабильными изотопами.
Часть рис. 1.14

зарядов) и имеют разную чётность. За исключением бора, различие распространённостей этих изотопов очень велико, до 6 порядков для изотопов гелия. Красным цветом показаны данные по второй группе, состоящей из более тяжёлых элементов. Их изотопы имеют одинаковую чётность и в этом случае распространённости отличаются менее,

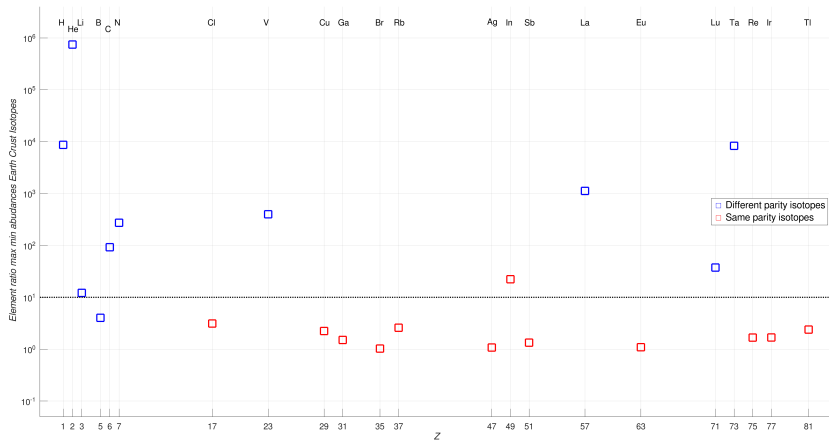


Рис. 2.21. Отношение распространённости изотопов химических элементов в коре Земли
По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

чем на порядок.

Отметим исключения. Литий ($A = 6, 7$) и бор ($A = 10, 11$) имеют разную чётность стабильных изотопов, при этом отношение распространённости изотопов этих элементов составляет 12 и 4. В то же время индий ($A=113, 115$) имеет отношение распространённости изотопов, равное 22.

2.4.1 Случай хлора.

Рассмотрим в качестве примера ситуацию с изотопами хлора. Это самый лёгкий из элементов, имеющих 2 изотопа с сопоставимыми распространённостями.

Ещё в XIX веке было известно, что атомная масса хлора заметно отличается от целочисленной. В частности, в аннотации пионерской публикации Д.И. Менделеева 1869 г. «Система химических элементов согласно их атомным весам и химическим свойствам» [2] рис. ?? был указан атомный вес, равный 35.5, что никак нельзя объяснить неточностью измерений.

³⁶ Ar STABLE 0.3336%	³⁷ Ar 35.04 d $\epsilon = 100.00\%$	³⁸ Ar STABLE 0.0629%
³⁵ Cl STABLE 75.76%	³⁶ Cl 3.01E+5 y $\beta^- = 98.10\%$ $\epsilon = 1.90\%$	³⁷ Cl STABLE 24.24%
³⁴ S STABLE 4.25%	³⁵ S 87.37 d $\beta^- = 100.00\%$	³⁶ S STABLE 0.01%

Рис. 2.22. Стабильные изотопы S Cl Ar — чёрные квадраты
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

На рис.2.22 чёрными квадратами представлены стабильные изотопы хлора и его соседей, серы и аргона. Нестабильный изотоп Cl^{36} имеет две моды превращений, бета-распад (98.1%) и электронный захват (1.9%).

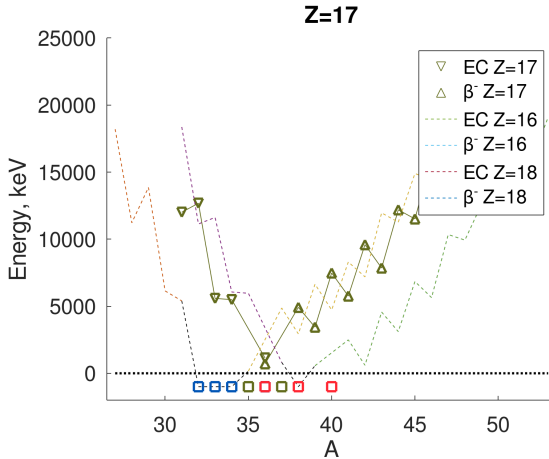


Рис. 2.23. Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Cl, S и Ar
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

На рис. 2.23 приведены графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов хлора, серы и аргона. Зелеными квадратами показаны стабильные изотопы хлора Cl^{35} , Cl^{37} . Синие квадраты соответствуют стабильным изотопам серы (32-34, 36), красные — ста-

бильным изотопам аргона (36, 38, 40).

Таким образом, изотоп Cl^{36} переходит путём бета-распада в изотоп Ar^{36} или путём электронного захвата в изотоп S^{36} .

2.4.2 Случай меди.

Помимо хлора, существенно нецелочисленные атомные массы были измерены в XIX в. и для ряда других элементов, в частности, для меди.

Конкретно, в [2] рис. ?? был указан атомный вес, равный 63.4, что-тоже никак не объясняется неточностью измерений.

64Zn ≥ 7.0E20 y 49.17% 2+	65Zn 243.93 d ε = 100.00%	66Zn STABLE 27.73%
63Cu STABLE 69.15%	64Cu 12.701 h ε = 61.50% β ⁻ = 38.50%	65Cu STABLE 30.85%
62Ni STABLE 3.6346%	63Ni 101.2 y β ⁻ = 100.00%	64Ni STABLE 0.9255%

Рис. 2.24. Стабильные изотопы Ni Cu Zn — чёрные квадраты
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

На рис.2.24 чёрными квадратами представлены стабильные изотопы хлора и его соседей, никеля и цинка. Нестабильный изотоп Cu^{64} имеет две моды превращений, бета-распад (38.5%) и электронный захват (61.5%).

На рис. 2.25 приведены графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов хлора, никеля и цинка. Зелеными квадратами показаны стабильные изотопы хлора Cu^{63} , Cu^{65} . Синие квадраты соответствуют стабильным изотопам никеля (58, 60-62, 64), красные — стабильным изотопам цинка (64, 66-68, 70).

Таким образом, изотоп Cu^{64} переходит путём бета-распада в изотоп Zn^{64} или путём электронного захвата в изотоп Ni^{64} .

2.5 Элементы с многими стабильными изотопами

Большое количество изотопов никак нельзя назвать редким свойством среди элементов. Достаточно посмотреть на гистограмму распре-

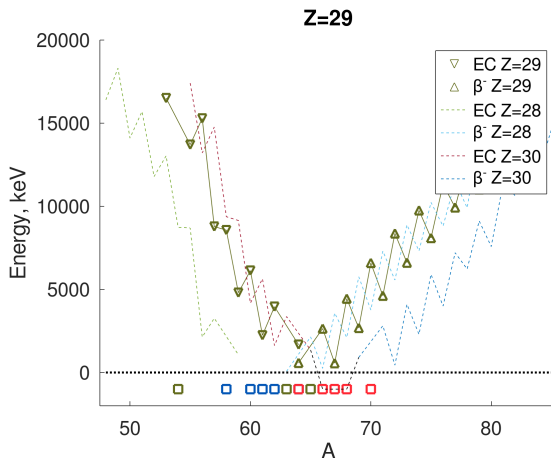


Рис. 2.25. Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Cu, Ni и Zn
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

деления числа стабильных изотопов у химических элементов рис. 1.13 в §1.1.3.

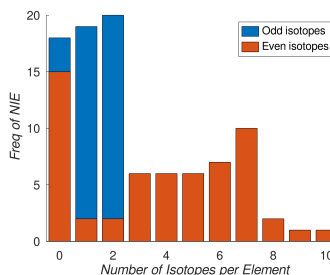


Рис. 2.26. Гистограмма числа изотопов химических элементов в коре Земли
— По данным https://www.nndc.bnl.gov/nudat3

На рис. 1.14 приведён график числа изотопов химических элементов в коре Земли с учётом чётности числа нуклонов.

В §1.1.3 обсуждается распространённость изотопов в природе, то имеется ряд закономерностей [8]. Оболочечная модель ядра (с. 24) хо-

Число изотопов	N	Z	Примеры Табл. 1.2
166	чётное	чётное	1 изотоп — ${}^9F^{19} \dots {}^{83}Bi^{109}$ 2 изотона — ${}^1H^1 \dots {}^{81}Tl^{203,205}$
55	чётное	нечётное	
47	нечётное	чётное	${}^1H^2, {}^3Li^6, {}^5B^{10}, {}^7N^{14}, {}^{47}Ag^{109}$
5	нечётное	нечётное	

Таблица 2.5. Распределение естественных изотопов по правилу чётности нуклонов

рошо согласуется с эмпирическим правилом повышения устойчивости ядер, содержащих чётное число протонов и нейтронов — Табл. 2.5. Менее стабильны ядра с нечётным числом протонов, но чётным числом нейтронов (и наоборот). Неустойчивыми являются ядра, в которых число протонов и нейтронов нечётное.

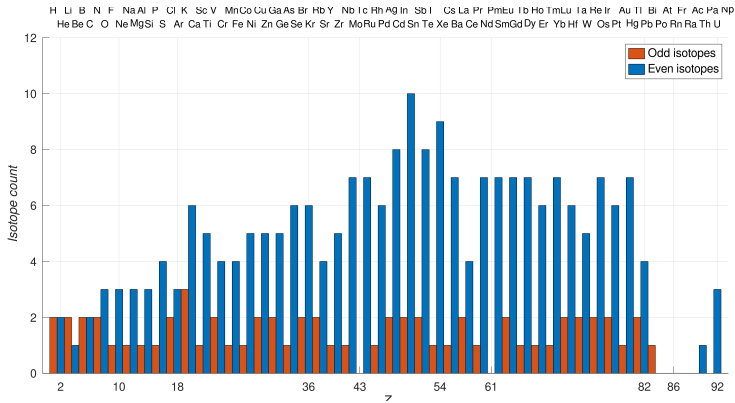


Рис. 2.27. Число изотопов для химических элементов
— По данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

Три и более изотопа имеют почти все изотопы с чётным числом нуклонов.

Особенно большое количество изотопов имеют элементы Pd, Cd, Sn, Te, Xe, Ba с электрическим зарядом 46, 48, 50, 52, 54, 56: от 6 до 10.

2.5.1 Случай олова

Олово — абсолютный рекордсмен по числу стабильных изотопов: их целых 10!

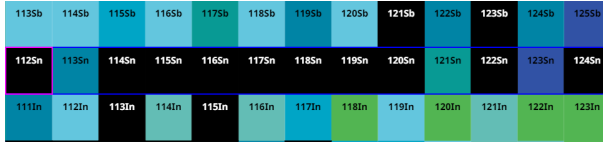


Рис. 2.28. Стабильные изотопы Sn In Sb — чёрные квадраты
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>

На рис.2.28 чёрными квадратами представлены стабильные изотопы олова и его соседей, индия и сурьмы.

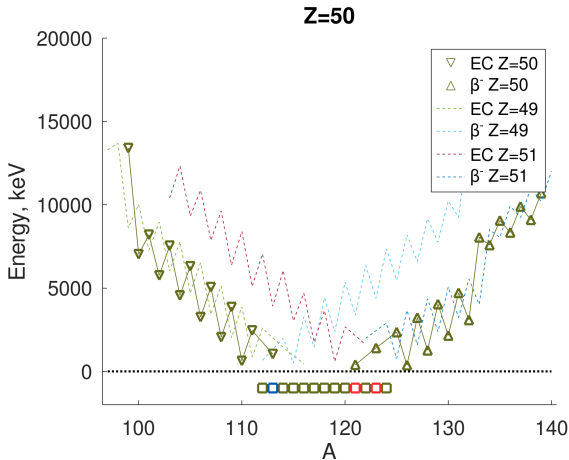


Рис. 2.29. Графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов Sn, In и Sb
— <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

На рис. 2.29 приведены графики энергий бета-распада и электронной конверсии для изотопов олова, индия и сурьмы. Зелеными квадратами показаны стабильные изотопы олова, Sn^{112} , $Sn^{114-120}$, Sn^{122} , Sn^{124} . Синие квадраты соответствуют стабильным изотопам индия (113, 115), красные — стабильным изотопам сурьмы (121, 123).

2.6 Примеры нуклеосинтеза, отличного от солнечной системы

Ввиду того, что звёзды различны по своей природе, распространённость элементов и изотопов на них различно.

Карбоновые (углеродные) звёзды. Углеродная звезда содержит в атмосфере больше углерода, чем кислорода. Эти компоненты смешиваются в верхних слоях звезды, образуя монооксид углерода CO , который связывает весь кислород в атмосфере. Оставшийся углерод образует различные соединения, по которым эти звёзды и обнаруживаются.

Технециевые звёзды. На некоторых звёздах обнаружены линии поглощения технеция. Этот факт свидетельствует об относительно недавнем рождении этого элемента и его вполне макроскопическом количестве.

Ядерный нуклеосинтез, рассмотренный в §1.3, в принципиальном плане определяет распространённость элементов и изотопов во Вселенной.

На Рис. 1.21 §1.3 приведена версия таблицы Менделеева, на которой указаны цветами механизмы происхождения различных элементов.

Как следует из Рис. 1.21, на Земле присутствуют элементы-потомки весьма разных предков, так что элементный состав Земли, во-первых богаче, чем продукция нуклеосинтеза Солнца, поскольку Солнечная система — результат взрыва *сверхновой звезды*. В таких случаях используется термин *звёздное население I*.

Во-вторых, между планетами и другими объектами Солнечной системы могут быть различия в распространённости элементов и их изотопном составе. Этот вопрос мы рассмотрим в §2.6.2.

Изотопный состав планеты, вообще говоря, величина непостоянная. Причины для этого можно разделить на внутренние, связанные с радиоактивным распадом элементов планеты, и внешние, обязанные взаимодействию атмосферы и тела планеты с космическим излучением. Абсолютный вклад и тех, и других процессов на Земле невелик. Относительная малость этих эффектов не означает их незначимость. В частности, накопление радона как продукта распада урана, и образование

тяжелых изотопов углерода и азота в атмосфере являются важными процессами.

В доступном для неспециалиста изложении многочисленные примеры использования изотопных подписей приводятся в книге палеонтолога А.Ю. Журавлёва «Сотворение Земли. Как живые организмы создали наш мир» [30].

2.6.1 Фракционирование изотопов в природе.

Фракционирование изотопов в природе, то есть, по массе, является проявлением очень общих закономерностей процессов, протекающих на планете. Поскольку химические свойства изотопов одного элемента очень близки друг к другу, то это предоставляет уникальную возможность исследования закономерностей эволюции планеты на больших масштабах времени. Изучая распространённость изотопов выбранного элемента в разных природных окружениях, на разных глубинах захоронения образцов, в разных по типу отложениях, в разных частях тел биологических останков, можно строить многомерные картины эволюции живого и минерального вещества Земли.

Хорошее введение в вопрос даётся в презентациях А.К. Яковлева [41] и Д.В. Гричука [42]. Первая из них относится к экологии, вторая — к геологии.

Для заинтересованного читателя можно отметить книгу В. Fry «Stable Isotope Ecology» [31] и сборник под редакцией К.А. Hobson и L.I. Wassenaar «Tracking Animal Migration with Stable Isotopes» [32].

2.6.2 Изотопная планетология

Изотопная планетология — новая ветвь науки, раздел планетологии. Согласно Википедии (<https://ru.wikipedia.org/wiki/Планетология>), «планетология — это комплекс наук, изучающих планеты и их спутники, а также солнечную систему в целом и другие планетные системы с их экзопланетами. Планетология изучает физические свойства, химический состав, строение поверхности, внутренних и внешних оболочек планет и их спутников, а также условия их формирования и развития.»

Планетология развилась из наук о Земле и объединяет множество дисциплин, в частности, связанных с планетной геологией, космохимией и астробиологией.

Изучение других планет, в первую очередь Солнечной системы, позволяет лучше понять и нашу планету. В частности, сравнение Земли и других внутренних планет Солнечной системы, Венеры и Марса, а также Луны, даёт информацию о влиянии различных факторов на формирование климата, тектоники и биосферы.

В частности, на Земле открыто около 5000 минералов, на Марсе — почти на порядок меньше, а на Луне — около 150 [30]. При этом более половины минералов на Земле прямо или опосредовано связано с наличием на ней жизни. Архейские бактериальные сообщества начали преобразовывать протокуру и постепенно запустили тектоническую активность. Живые существа в ходе своего метаболизма меняют изотопные балансы, в частности, углерода. По изотопным подписям различных геологических пород и включений в них, можно делать выводы о процессах, протекавших в разные геологические эпохи. На разных стадиях эволюции климата планет изотопная подпись разная. В бескислородные периоды живые организмы можно классифицировать по изотопным подписям углерода и серы. Например, метаногенез производится археями и бактериями.

В качестве примера комплексного сравнительного исследования, привлекающего данные разных планет, можно привести статью «Изотопные следы активности раннего солнца» [43], где приводятся данные по изотопным отношениям азота и углерода для ряда планет Солнечной системы и *марсианского метеорита* Allan Hills 84001. Образование изотопа ^{15}N происходит в ядерных реакциях протонов и нейтронов с ^{16}O . В атмосферах с малым содержанием кислорода ^{15}N образуется преимущественно при захвате нейтрона ^{14}N . Изотоп ^{13}C образуется из ^{14}N .

Изотоп. отн.	Земля	Марс	Венера	ALH84001
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	3.66 ± 0.01	5.8 ± 0.4	3.7 ± 0.7	3.875
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	11.23 ± 0.05	11.75 ± 0.04	12 ± 2	11.75 ± 0.09

Таблица 2.6. Изотопные отношения для ряда планет Солнечной системы и марсианского метеорита Allan Hills 84001, умноженные на 10^3

Как видно из данных Табл. 2.6, имеются значимые различия в изотопном составе планет и метеоритов.

Одним из важнейших факторов формирования климата планеты является *карбонатно-силикатный геохимический цикл*, который отвечает примерно за 80% обмена углекислым газом между планетой и ее атмосферой [44]. «Цикл начинается с образования угольной кислоты (H_2CO_3) в атмосфере, когда содержащийся в ней углекислый газ растворяется в капельках воды, выпадающей затем в виде дождевых осадков на земную поверхность. Угольная кислота вступает в реакцию с кальциево-силикатными минералами (соединения кальция, кремния и кислорода), находящимися на поверхности, и высвобождает ионы кальция и бикарбоната (Ca^{++} и HCO_3^-), которые поступают в грунтовые и поверхностные воды и в конечном счете попадают в океан.

В океанах и морях ионы кальция и бикарбоната извлекаются морскими организмами для строительства своих скелетов, покровов, оболочек, а затем, после отмирания организма, на дне водоемов формируются карбонатные осадочные породы.

Согласно теории литосферных плит, объясняющей движение отдельных блоков литосферы, рано или поздно осадочные породы океанического дна должны погрузиться в недра Земли. Здесь в условиях высокой температуры и давления происходит *карбонатный метаморфизм* — карбонат кальция соединяется с кремнием (кварцем), образуя силикатные породы и выделяя газообразный CO_2 , возвращающийся в атмосферу через вулканы, срединно-океанические хребты, рифтовые зоны.

Карбонатно-силикатный цикл будет происходить до тех пор, пока в недрах Земли выделяется тепло. Если Земля остынет настолько, что движение плит прекратится, то это станет началом конца жизни на Земле.

Поскольку живые организмы играют важную роль в круговороте углекислого газа, так же как и важнейшим звеном карбонатно-силикатного цикла являются морские организмы, можно предположить, что биота несет главную ответственность за изменения климата Земли. Уменьшение содержания CO_2 в атмосфере в течение всей геологической истории Земли было прямым следствием биологического «вмешательства», без живых организмов развитие земного климата, возможно, могло пойти по другому пути.»

2.7 Масштабы времени природных явлений

В этом разделе мы рассмотрим масштабы времени для различных классов явлений. Такое рассмотрение необходимо для того, чтобы сопоставлять время жизни конкретных изотопов и других процессов на Земле, связанных как с планетой в её геологическом развитии, так и с жизнью и эволюцией биосферы.

2.7.1 Ядерные масштабы времени

Природные процессы протекают с различной скоростью. В связи с этим, важно разобраться, какие изотопы могут о них «рассказать». Фракционирование изотопов по массе, скорости течения химических реакций и т.д. приводит к обогащению одних объектов и обеднению другими. Для надёжного обнаружения этого факта необходимо, чтобы «время жизни» изотопа, его период полураспада был сопоставим или превышал интересующий нас в конкретном случае интервал времени.

Ядерные масштабы времени имеют колоссальные различия. Рисунок 1.3 из §1.1.1 не даёт полного представления степени этой изменчивости. Из легенды к графику на сайте <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/> можно узнать, что цветовая легенда имеет размах

$$T \sim 10^{-15} - 10^{15} \text{ с.} \quad (2.1)$$

Разброс времён жизни ядер по этой шкале составляет 30 порядков! Реально эта величина ещё больше, поскольку заметное количество изотопов имеет время жизни более 10^{25} с.

Меньшая величина рисунку 1.3 на соответствует периоду колебания видимого света — см. материал И.П.Иванова «Фемтосекунды: 1. Мир электронов и света» <https://elementy.ru/time/femto/femto-1.html>.

$$T = \frac{\lambda}{c} \approx \frac{0.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \approx 10^{-15} \text{ с.} \quad (2.2)$$

Также время между столкновениями электронов в металлах имеет порядок *скорости Ферми* $v_F \approx 10^6$ м/с. (Квантовая теория (Л.К. Мартинсон, Е.В. Смирнов) — http://fn.bmstu.ru/data-physics/library/physbook/tom5/ch6/texthtml/ch6_5.htm) также имеет тот же порядок.

$$T = \frac{r_A}{v_F} \approx \frac{10^{-8} \text{ м}}{10^6 \text{ м/с}} \approx 10^{-14} \text{ с.} \quad (2.3)$$

Большая величина времени жизни ядер 10^{15} с $\approx 10^{12}$ лет намного превышает *время жизни Вселенной* $\approx 14 \cdot 10^9$ лет.

Для абсолютного любого природного процесса существуют атомные ядра, время жизни которых существенно меньше, сопоставимы или намного больше временного масштаба этого явления. Таким образом, всегда найдутся изотопы, изучение отношения которых даст информацию об исследуемом процессе.

Например, в §2.6.2 в таблице 2.6 «Изотопные отношения ... для ряда планет Солнечной системы и марсианского метеорита Allan Hills 84001» приводятся отношения стабильных изотопов азота и углерода. Эти величины сформировались на масштабах жизни Солнечной системы.

Важным обстоятельством, помимо времён жизни изотопов ядер, является тот факт, что большинство элементов имеет два и более стабильных изотопа — см. таблицу 1.2 «Количество стабильных изотопов различных элементов на Земле» §1.1.3. Таким образом, даже на основании анализа распространённости изотопов даже одного элемента во многих случаях можно получить важную информацию о природных явлениях.

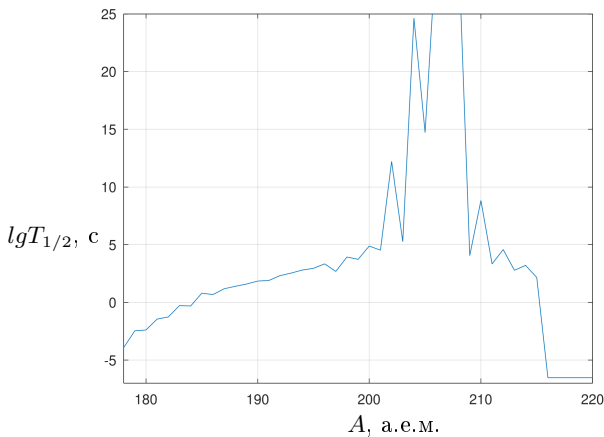


Рис. 2.30. Время жизни изотопов свинца

Рисунок 2.30 иллюстрирует разнообразие времён жизни изотопов элемента на примере свинца. Электрический заряд $Z = 82$, а число нейтронов $N = 96 \dots 138$. Изотопы свинца с атомным весом 204, 206-

208 стабильны. Другие изотопы имеют время жизни от 10^{-5} от 10^{15} с. Вариативность атомных весов свинца на Земле очень велика, как в различных породах, так и географически, см. §4.2.

2.7.2 Различные масштабы времени в эволюции Земли

Для нашей планеты геологическое развитие и эволюция биосферы очень тесно связаны. Геологическая активность, континенты, океаны и атмосфера, климат и биота сосуществуют и влияют друг на друга. Подробно эта связь обсуждается в книге А.Ю.Журавлева «Сотворение Земли. Как живые организмы создали наш мир» [30]. Поэтому приводимое далее разделение на геологические и биологические процессы в значительной степени условно. В этом смысле Земля уникальна, а следовательно, уникальны и её временные циклы и, соответственно, изотопные портреты в разные эпохи развития.

При этом Земля, по образному выражению Александра Чижевского, находится «в объятиях Солнца» [33]. На Землю влияет и Солнце, и в более широком смысле, вся Солнечная система.

Астрономические масштабы времени

Солнечная система возникла около 4.5 млрд. лет назад. Возраст Земли составляет 4.54 миллиарда лет по данным радиоизотопной датировке одного из типов метеоритов — *хондритов*. *Метеоритом* называют любой объект космического происхождения более 2 мм. Наиболее современным обзором (2023) является книга Т.Грегори «Метеориты. Космические камни, создавшие наш мир» [34]. Ввиду того, что метеориты прибывают на Землю регулярно (в сутки на Землю падает несколько тонн метеоритов, или около 2 тысячи тонн в год), их изучение даёт богатую информацию о Космосе.

В частности, обнаружены метеориты более древние, чем Солнечная система. Свежий пример - *метеорит Erg Chech 002*, его возраст составляет 4.57 млрд лет [35].

Очень древние включения обнаружены в метеорите Murchison CM2, их возраст достигает 7 млрд лет, значительно старше Солнечной системы [36].

Орбита Земли имеет эллиптическую форму и претерпевает постоянные изменения. У эллипса есть главное направление, линия от пе-

ригелия до афелия, а характеристика отличия от круга называется эксцентриситет. В настоящее время $\varepsilon \approx 0.017$. И направление, и эксцентриситет орбит периодически меняются: эллипс проворачивается, а также становится то более вытянутым, то совсем круглым. Колебания эксцентриситета орбиты Земли. Быстрые колебания имеют период около 100 тыс. лет, медленные — в несколько раз больше, около 300 тыс. лет.

Угол наклона земной оси вращения к плоскости эклиптики меняется в диапазоне $22.1 - 24.5^\circ$ на масштабе в 40 т. лет, орбита Земли также имеет нутации. Достаточно популярное изложение можно найти в статье [37] по ссылке <https://www.astronet.ru/db/msg/1195760>. «Ось вращения Земли испытывает смещения двух видов: движение с периодом примерно 26 тысяч лет называется прецессией, а более короткие движения, которые накладываются на прецессионное движение и периоды которых лежат в интервале от 18 с половиной лет до нескольких суток нутацией. Причиной прецессионно-нутационного движения оси вращения Земли является притяжение экваториального избытка масс Земли Луной и Солнцем. Силы притяжения пытаются совместить плоскость экватора Земли с плоскостью ее орбиты, однако из-за вращения Земли этого не происходит.»

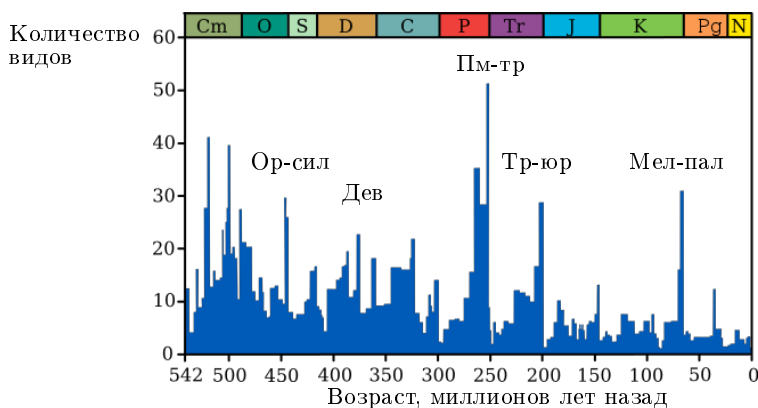
Геохронологическая шкала истории Земли

Геохронологическая (стратиграфическая) шкала — геологическая временная шкала истории Земли, применяемая в геологии и палеонтологии. Шкала имеет масштабы времени в сотни тысяч и миллионы лет.

Началом шкалы служит возраст *метеорита Альенде*, который очень тщательно изучен. Его возраст 4568.5 ± 0.5 млн лет [39]. Время формирования Земли как планеты может быть позже этой даты на миллионы и даже многие десятки миллионов лет.

- 2.45 млрд лет — кислородная катастрофа — исчезли почти все анаэробы;
- 440 млн лет назад — ордовикско-силурийское вымирание — исчезло более 60 % видов морских беспозвоночных;
- 364 млн лет назад — девонское вымирание — численность видов морских организмов сократилась на 50%;

- 251.4 млн лет назад — «великое» пермское вымирание, самое массовое вымирание из всех, приведшее к исчезновению более 95 % видов всех живых существ;
- 199.6 млн лет назад — триасовое вымирание — в результате которого вымерла, по меньшей мере, половина известных сейчас видов, живших на Земле в то время;
- 66 млн лет назад — мел-палеогеновое вымирание — массовое вымирание, уничтожившее шестую часть всех видов, в том числе и нептичьих динозавров.
- 33.9 млн лет назад — эоцен-олигоценовое вымирание — уступает в масштабах предыдущим 5 массовым вымираниям, значительно изменился состав морской и наземной флоры и фауны
- 130 тыс. лет назад — настоящее время: позднелайстоцен — голоценовое вымирание[1] — массовое вымирание, вызванное в значительной степени человеческой деятельностью, наиболее пострадала мегафауна.



Последующее время в истории Земли было разделено на различные временные интервалы. Их границы проведены по важнейшим событиям, происходившим тогда. Граница между эрами фанерозоя проходит по крупнейшим эволюционным событиям — глобальным вымираниям биоты. Палеозой отделён от мезозоя крупнейшим за историю

Земли пермо-триасовым вымиранием видов. Мезозой отделён от кайнозоя мел-палеогеновым вымиранием.

В статье [38] представлен частотный анализ изотопа кислорода ^{18}O в бентосе. *Бентос* (от греч. *βενθος* — глубина) — совокупность организмов, обитающих на грунте и в грунте дна водоёмов.

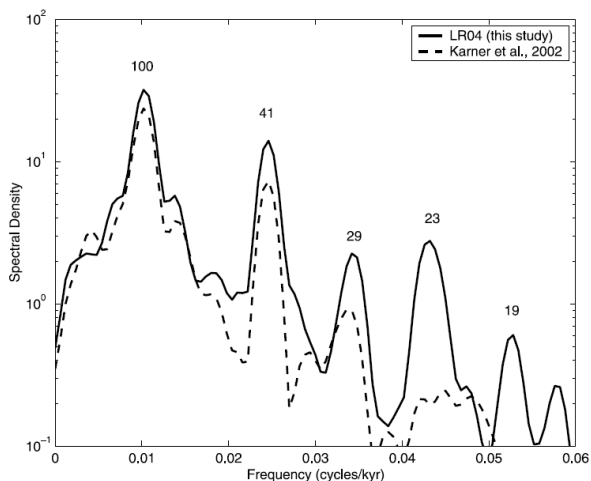


Рис. 2.32. Спектральная плотность изотопа кислорода в бентосе

Тектоника континентов

Палеотектонические реконструкции на основе тектоники плит. — https://edu.kpfu.ru/kek/geotektonika/4_3.php

Проведение палеотектонических реконструкций представляет собой один из важных и сложных видов геологических исследований. Они необходимы для выявления особенностей формирования каких-либо структурных элементов или крупных территорий, истории их развития и взаимосвязи, прогнозирования новых месторождений полезных ископаемых и т.д. Суть данных реконструкций состоит в восстановлении строения и палеогеографических условий формирования отдельных структур или территорий в геологическом прошлом. Реконструкции могут проводиться на один или несколько последовательных отрезков времени, при этом они базируются на определенных представлении-

ях теоретической геологии. До 60-70-х годов прошлого столетия палеотектонические карты (реконструкции) составлялись на основе геосинклинальной теории, по которой структурообразование протекает за счет проявления, в основном, вертикальных тектонических движений.

С 1970-1980-х годов они проводятся уже на базе тектоники плит, постулирующей крупномасштабные горизонтальные перемещения отдельных блоков литосферы.

Самыми интересными и трудоемкими являются глобальные (в масштабе всей Земли) реконструкции основных структурных элементов литосферы – океанов и континентов – в течение длительного времени. Наиболее достоверными из них являются построения на венд-фанерозойский этап развития Земли (последние 650 млн. лет). Это связано с его более удовлетворительной изученностью, в сравнении с более ранним периодом развития планеты, за счет возможности использования биостратиграфического метода датирования горных пород, являющихся основным источником информации о палеотектонических условиях своего формирования.

Венд-фанерозойский этап развития Земли в тектоническом отношении можно подразделить на 3 временных подэтапа. Первый из них, с возрастными границами 650-320 млн лет назад (венд - ранний карбон), представляет время формирования и развития океанов Япетус, Тетис и др., образовавшихся за счет распада 750-800 млн лет назад суперконтинента Родиния, предположительно сформированного на рубеже 1,0 млрд лет т.н.

Приведём пример реконструкции К.Р. Скотиза. В *Девонском периоде* (419 – 358 млн лет назад) океаны раннего Палеозоя начали закрываться. Пресная вода могла проникать из южного полушария в Северную Америку и Европу. Климат на всей Земле был тропическим. В это время рыбы достигают огромного разнообразия, поэтому период имеет неофициальное название «эпоха рыб».

Второй подэтап – 320-200 млн лет т.н. (ранний карбон – поздний триас) – это период образования суперконтинента, который А. Вегенером в начале XX века был назван *Пангеей* [40].

Этот позднепалеозойско-раннемезозойский суперконтинент в настоящее время никем серьезно не оспаривается, т.к. он хорошо доказан комплексом геолого-геофизических данных. Его реконструкции, при условии неизменности объема Земли за последние 200 млн лет, практически идентичны у большинства тектонистов. Третий временной интервал - 200-0 млн лет - это период раскола Пангеи-II, раскрытия и

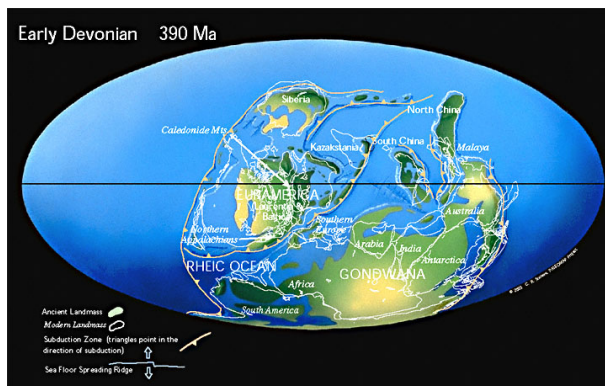


Рис. 2.33. Реконструкция континентов в Девонском периоде
<http://www.scotese.com/newpage3.htm>

развития Атлантического, Индийского и Северного Ледовитого океанов, и обособления шести современных континентов (Рис. 4.31).

2.7.3 Коэволюция природных явлений на Земле

В §2.7.2 рассмотрены сначала масштабы существования изотопов различных элементов. Далее был совершён экскурс по масштабам различных природных явлений (тектоника, климат, жизнь атмосферы и океана, эволюция биоты) на нашей планете. В геологическую летопись эти явления входят во взаимном переплетении, и между ними существуют различные связи.

В публикациях последних десятилетий различными авторами проводится мысль о *коэволюции* природных явлений на Земле, компонент живой и неживой природы. На русском языке издано ряд популярных книг ведущих специалистов, внесших свой вклад в развитие этой идеи. Среди них книги Р. Хейзена «Симфония №6: Углерод и эволюция почти всего» [25] и «История Земли. От звездной пыли - к живой планете. Первые 4 500 000 000 лет» [26], П. Уорда и Д. Киршвинка «Новая история происхождения жизни на Земле» [29], А.Ю. Журавлёва «Сотворение Земли. Как живые организмы создали наш мир» [30].

Приведём некоторые сведения об эволюции Земли, которые ещё слабо отражены в учебной литературе.

Эволюция минералов На сайте <https://hazen.carnegiescience.edu> данные роста численности минералов таблицы 1 приводятся в виде графика.

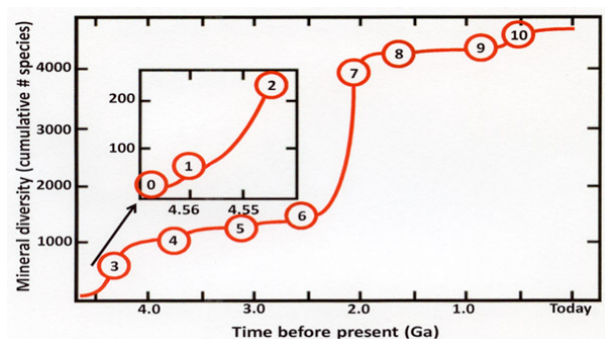


Рис. 2.34. Ten stages of mineral evolution of terrestrial planets.
<https://hazen.carnegiescience.edu>

Р. Хейзен выдвинул концепцию совместной эволюции минералов и биоты. В коллективном обзоре «Эволюция минералов» [27] представлен обширный материал, в котором произведено разбиение *эволюции минералов* в истории Земли на 10 этапов. Наиболее радикальной являются идеи роли минералов в зарождении жизни на Земле как необходимой структуры для формирования сложной органики, и обратного влияния на минералы биоты. «Основываясь на обзоре литературы, Хейзен и его соавторы подсчитали, что количество минералов в Солнечной системе выросло с примерно дюжины на момент ее формирования до более чем 4300 в настоящее время. (По состоянию на 2017 год последнее число выросло до 5300). Они предсказали, что с течением времени происходит систематическое увеличение числа видов минералов, и определили три основные эпохи изменений: формирование Солнечной системы и планет; переработка коры и мантии и начало тектоники плит; и появление жизни. После первой эры минералов было 250; после второго - 1500. Остальные стали возможными благодаря действию живых организмов, в частности добавлению кислорода в атмосферу. За этой статьей в течение следующих нескольких лет последовало несколько исследований, концентрирующихся на одном химическом элементе и намечающих первые появления минералов, включающих каждый элемент.» См. также материал §2.6.2.

В статье [28] приводится пример для роста разнообразия минералов бериллия.

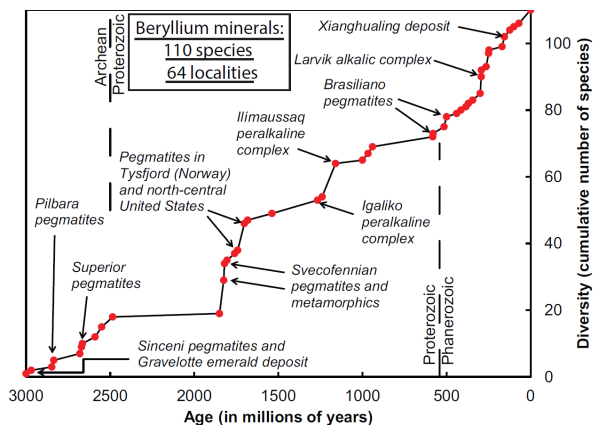


Рис. 2.35. Рост разнообразия минералов бериллия [28]

График рис. 2.35 имеет характерный вид с резкими ступеньками, связанными с важными событиями эволюции Земли.

Глава 3

Периодическая таблица элементов и изотопов

Эта глава носит информационный характер. Значительно более подробно материал представлен в [45].

Международный союз теоретической и прикладной химии IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry, рус. аббр. ИЮПАК) занимается, в частности, стандартизацией атомного веса элементов через один из старейших постоянных комитетов — Комиссии по изотопному и атомному весу (Commission on Isotopic Abundances and Atomic Weights, CIAAW) [48].

3.1 Таблица Менделеева с изотопными данными

В целом таблица Менделеева выглядит как показано на рисунке 3.1 [46]. Легенда цветового поля каждого элемента дана в таблице.

Перейдём к описанию изотопного состава элементов.

В периодической таблице Менделеева, поддерживаемой Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC, приводятся интервальные границы стабильных изотопов химических элементов. Например, для кислорода, имеющего 3 изотопа с атомными массами

Цвет фона	Пояснение
красный	элемент имеет два или более стабильных изотопов. Соотношения изотопов различны в различных распространённых материалах. Эти вариации надёжно определены, атомный вес указывается в виде интервала, в квадратных скобках;
жёлтый	элемент имеет два или более стабильных изотопов. Соотношения изотопов различны в различных распространённых материалах. При этом невозможно дать надежные оценки нижних и верхних границ изменений. Атомный вес даётся с неопределённостью, которая включает ошибку измерений и неопределённость вариации изотопных отношений;
голубой	элемент имеет один стабильный изотоп. Атомный вес даётся с неопределённостью, которая включает ошибку измерений.
белый	элемент не имеет стабильных изотопов. в распространённых материалах не содержится в таких количествах, по которым можно дать оценку изотопных отношений.

Таблица 3.1. Обозначения на рис. 3.1.

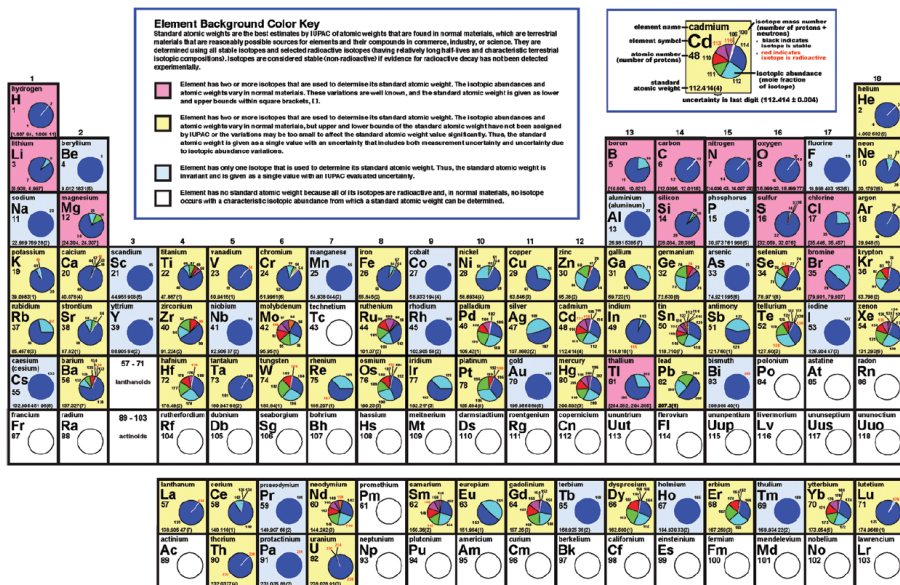


Рис. 3.1. Таблица Менделеева элементов и изотопов [46]

16, 17 и 18 на стр. 1858 статьи [46] приводятся данные, часть которых представлена в Табл. 3.2.

Таблица 3.2. Стабильные изотопы кислорода.

Стабильный изотоп	Молярная доля
^{16}O	[0.997 38, 0.997 76]
^{17}O	[0.000 367, 0.000 400]
^{18}O	[0.001 87, 0.002 22]

Компактное представление кислорода в таблице Менделеева выглядит следующим образом.

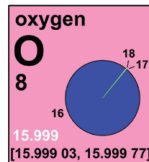


Рис. 3.2. Представление кислорода в таблице Менделеева

На рисунке 3.2 дано наглядное представление о распространенности изотопов кислорода в природе в форме полярной диаграммы. В нижней строчке приведён интервал атомной массы.

Для каждого стабильного изотопа приведены границы, в пределах которых данный изотоп встречается в различных породах, атмосфере, водной среде в различных местах Земли. Подробные сведения приводятся на рисунках 4.8.1-4.8.3 из работы [46].

Например, в случае ртути, известны изотопы с массовыми числами от 170 до 216 (количество протонов 80, нейтронов от 90 до 136). Природная ртуть состоит из смеси 7 стабильных изотопов:

Приведённые в таблице 3.3 величины распространённости служат исходными данными для построения гистограммы частот. Конкретно для атомов ртути этот рисунок показан на Рис. 3.3.

Относительно характера графика, представленного на Рис. 3.3, следует заметить следующее, см. §1.1. Согласно современным представлениям, атомное ядро составляют протоны и нейтроны (нуклоны). Характер сил, действующих между ними, таков, что для лёгких ядер количества протонов и нейтронов примерно равны, с небольшим преоб-

Таблица 3.3. Стабильные изотопы ртути.

Изотоп	Распространённость
^{196}Hg	0,155 %
^{198}Hg	10,04 %
^{199}Hg	16,94 %
^{200}Hg	23,14 %
^{201}Hg	13,17 %
^{202}Hg	29,74 %
^{204}Hg	6,82 %

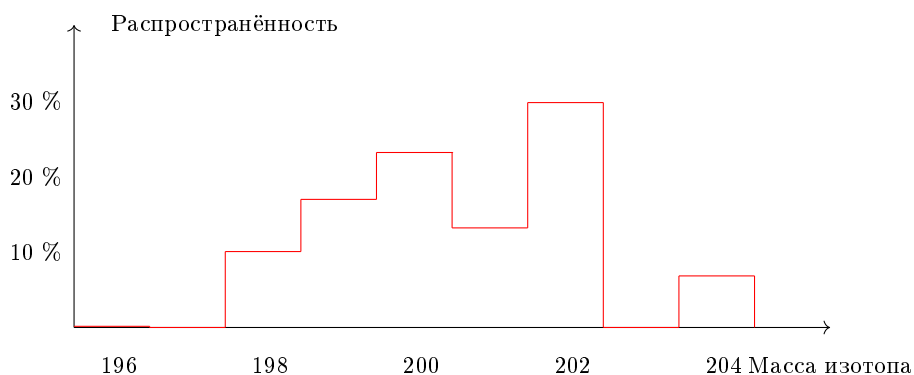


Рис. 3.3. Распространённость изотопов ртути на Земле

ладанием последних. Число стабильных изотопов при этом невелико. В ядрах тяжёлых элементов нейтронов существенно больше, чем протонов, и количество изотопов может достигать десятков, из которых стабильна небольшая часть. При этом количество стабильных изотопов с чётным количеством нуклонов заметно превышает количество стабильных изотопов с нечётным количеством нуклонов. Для энергетически выгодной конфигурации количества нуклонов существуют и другие закономерности, подобные принципу заполнению электронных оболочек атомов (см. §1.1).

В целом график распределения стабильных изотопов для данного химического элемента имеет неправильную форму с возможными «пробелами» внутри графика, как правило, для нечётных атомных масс,

что в случае ртути имеет место для изотопов с массами 197 и 203. Процентное содержание изотопа с массой 196, весьма малое: 0.155 %, но надёжно определяется.

3.2 Таблица стандартных атомных весов

Таблица стандартных атомных масс [49] приводится в порядке возрастания атомного номера (Таблица 3.5). Она предназначена для применения ко всем обычным земным материалам с небольшими исключениями согласно сноскам.

Стандартные атомные массы в таблице даны в виде одного значения с неопределенностями или в виде интервала (таблица 3.5, столбцы 4 и 5).

- 4 Атомный вес в интервальной форме или среднее значение
- 5 Неопределённость
- 6 Комментарий
- g Известны геологические и биологические материалы, в которых элемент имеет изотопный состав за пределами нормального материала. Разница между атомным весом элемента в таких материалах и указанное в таблице может превышать указанную погрешность.
- m Модифицированные изотопные составы можно найти в коммерчески доступных материалах, потому что материал был подвергнут неизвестному или непреднамеренному изотопному фракционированию. Могут возникнуть существенные отклонения атомного веса элемента от указанного в таблице.
- r Диапазон изотопного состава обычного земного вещества не позволяет получить более точный стандартный атомный вес; табличное значение и неопределенность должны быть применимы к обычному материалу.
- 7 Атомный вес — среднее значение
- 8 Неопределённость — округлено до 0.001

Таблица 3.4. Таблица стандартных атомных весов 2021 —
Обозначения столбцов

Приведём некоторые пояснения к обозначениям в Табл. 3.5. Для использования более крупного шрифта опущен столбец (1), содержащий английское название элемента. Для согласованности с исходным текстом IUPAC, нумерация столбцов начинается с 2. В Табл. 3.5 приведены данные для элементов с атомными номерами 1-26. Они включают в себя все биогенные элементы. В этом диапазоне соержатся 11 элементов с интервальными значениями атомных весов. Далее приведён бром с атомным номером 35 как еще один элемент с интервальным значением атомного веса. С существенным разрывом добавлена группа элементов

с атомными номерами 77-82. В их числе два элемента таллий (81) и свинец (82) с интервальными значениями атомных весов. Кроме того, иридий (78) упоминается для пояснения обозначений неопределённости его атомного веса. Данные об изотопном составе ртути приводятся в качестве иллюстрации в таблице 3.3.

В главе представлена современная версия таблицы Менделеева с интервальными значениями атомных весов, разработанная Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC. В интерактивной форме таблица доступна на сайте <https://www.isotopesmatter.com/> по адресу <https://applets.kcvs.ca/IPTEI/IPTEI.html>.

В публикации [46] предложена расширенная версия периодической системы химических элементов. Авторы пишут: «Периодическая таблица элементов и изотопов (Periodic Table of the Elements and Isotopes — IPTEI) IUPAC была создана для ознакомления студентов, преподавателей и непрофессионалов с существованием и важностью изотопов химических элементов.» Они также предлагают использовать её в качестве наглядного пособия, подобно таблице периодических элементов.

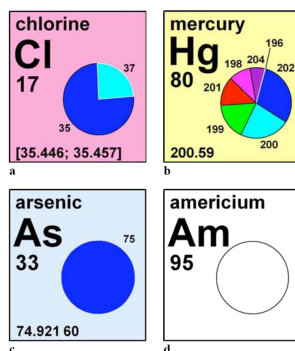


Рис. 3.4. Способы иллюстрации атомных весов

Символ	Атомный номер	Вес	Неопреде- лённость	Комм-й	Вес	Неопреде- лённость
2	3	4	5	6	7	8
H	1	[1.000784, 1.00811]		m	1.0080	0.0002
He	2	4.002602	0.00002	g r	4.0026	0.0001
Li	3	[6.938, 6.997]		m	6.94	0.06
Be	4	9.0121831	0.0000005		9.0122	0.0001
B	5	[10.806, 10.821]		m	10.81	0.02
C	6	[12.0096, 12.0116]			12.011	0.002
N	7	[14.00643 14.00728]		m	14.007	0.001
O	8	[15.99903, 15.99977]		m	15.999	0.001
F	9	18.998403162	0.000000005		18.998	0.0001
Ne	10	20.1797	0.0006	g m	20.180	0.0001
Na	11	22.98976928	0.00000002		22.990	0.0001
Mg	12	[24.304, 24.307]			24.305	0.002
Al	13	26.9815384	0.0000003		26.982	0.0001
Si	14	[28.084, 28.086]			28.085	0.001
P	15	30.973761998	0.000000005		30.974	0.0001
S	16	[32.059, 32.076]			32.06	0.02
Cl	17	[35.446, 35.457]		m	35.45	0.01
Ar	18	[39.792, 39.963]			39.95	0.16
K	19	39.0983	0.001	g	39.098	0.001
Ca	20	40.078	0.004	g	40.078	0.004
Sc	21	44.955907	0.000004		44.956	0.001
Ti	22	47.867	0.001		47.867	0.001
V	23	50.9415	0.0001		50.942	0.001
Cr	24	51.9961	0.0006		51.996	0.001
Mn	25	54.938043	0.000002		54.938	0.001
Fe	26	55.845	0.002		55.845	0.002
...	...	...	...	...	...	...
Br	35	[79.901, 79.907]		g	79.904	0.003
...	...	...	...	...	...	...
Ir	77	192.217	0.002		192.22	0.01
Pt	78	195.084	0.009		195.08	0.02
Au	79	196.966570	0.000004		196.97	0.01
Hg	80	200.952	0.003		200.59	0.01
Tl	81	[204.382, 204.385]			204.38	0.01
Pb	82	[206.14, 207.94]			207.2	1.1
...	...	...	...	...	...	...
Th	90	232.0377	0.0004	g	232.04	0.01
U	92	238.02891	0.00003	g m	238.03	0.01
...	...	...	...	...	...	...

Таблица 3.5. Таблица стандартных атомных весов 2021

Глава 4

Данные IUPAC-2021. «Особые элементы» на Земле.

Уточнено понятие, *нормального материала*. Это материал, происходящий из земного источника, за исключением

- (1) материалов, которые подверглись существенной искусственной изотопной модификации,
- (2) внеземные материалы,
- (3) изотопно-аномальные образцы, такие как природные продукты ядерного реактора из Окло (Габон) или другие уникальные явления.

В отличие от предыдущего определения, это пересмотренное определение признает тот факт, что изменение атомного веса некоторых элементов обусловлено процессами изотопного фракционирования, которые действуют на разных масштабах времени - см. §2.7.

Он также вновь вводит исключение внеземных материалов из определения Стандартные атомные веса. Новое определение более всеобъемлющее, чем некоторые более ранние версии, в отношении встречающиеся в природе материалы, имеющие нуклеогенные и радиогенные изотопные вариации, на примере аргона [55] и свинца [58].

Именно эти два элемента, аргон и свинец, имеют особое, исключительно для Земли, распределение изотопов. В определённом смысле, это «визитная карточка» нашей планеты.

4.1 Аргон

Аргон является уникальным веществом. Удивительно, что газ, который составляет около 1% атмосферы по массе, был открыт только в конце XIX в. Причиной такого «равнодушия» является химическая инертность этого газа. Собственно, это первый *благородный* газ, открытый на Земле.

4.1.1 Изотопы аргона

Согласно ядерным данным, §1.1 и табл. 6.3, аргон имеет 3 стабильных изотопа.



Рис. 4.1. Период полураспада изотопов аргона и его стабильные изотопы

— <https://applets.kcvs.ca/IPTEI/IPTEI.html>

Аргон представлен в земной атмосфере тремя стабильными изотопами: ³⁶Ar (0.337 %), ³⁸Ar (0.063%), ⁴⁰Ar (99.600 %). При этом в солнечной фотосфере и в атмосферах планет-гигантов изотопное содержание ⁴⁰Ar составляет лишь ≈ 0.01 %. Это объясняется тем, что почти весь аргон, содержащийся в земной атмосфере и недрах, является радиогенным — образован в результате постепенного распада ⁴⁰K.

На Рис. 4.2 графически представлены данные о распространённости изотопов калия (Z=19) и аргона (Z=18) на Земле в координатах (A, Z). Легенда справа отвечает распространённости элементов для каждого элемента среди его изотопов.

Калия на Земле относительно очень много. *Кларк* (кларк элемента — число, выражающие среднее содержание химических элементов в системе) калия в земной коре составляет 2.4% (5-й по распространённости металл, 7-й по содержанию в земной коре элемент). Соответственно, даже небольшая доля радиоактивного изотопа ⁴⁰K, равная 0.012%, тоже велика. Период полураспада этого изотопа составляет $\approx 10^9$ лет, и на

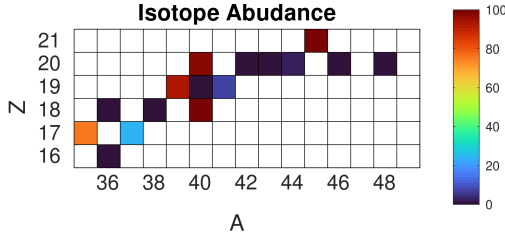
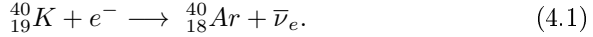


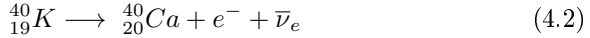
Рис. 4.2. Распространённость изотопов калия и аргона на Земле.
— по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

геологических масштабах времени (см. §2.7.2) привело к образованию огромного количества изотопа ^{40}Ar .

Образование аргона ^{40}Ar идёт путём захвата орбитального электро- на §1.2.2 (вероятность $10.72 \pm 0.13\%$) (4.1)

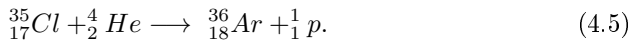
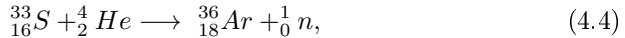
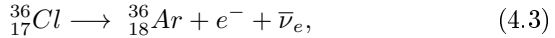


На Рис. 4.2 этому процессу соответствует переход по вертикали вниз (40, 19) — (40, 18) в координатах (A, Z). Переход по вертикали вверх (40, 19) — (40, 20) соответствует электронному бета-распаду



и пополняет природу изотопом $^{40}_{20}\text{Ca}$. Это самый распространённый изотоп кальция.

Вероятные источники происхождения изотопов ^{36}Ar и ^{38}Ar — неустойчивые продукты спонтанного деления тяжёлых ядер, а также реакции захвата нейтронов и альфа-частиц ядрами лёгких элементов, содержащихся в урано-ториевых минералах:



4.1.2 Изотопы аргона на Земле

Общая картина распространённости изотопов аргона, калия и кальция в земной коре приведена на рис. 4.3. Актуальным источником данных является база данных МАГАТЭ NUBASE2020 [14].

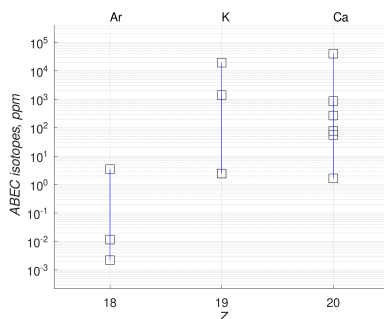


Рис. 4.3. Распространённость изотопов аргона, калия и кальция в земной коре

Изотопный состав аргона в земных материалах изменчив. Эти вариации являются источником неопределённости в определении стандартных свойств аргона, в то же время они дают полезную информацию во многих областях науки. Большой объём информации о весах аргона в различных природных средах дан в публикации [55].

В официальной публикации IUPAC 2022 [49] года приводится рисунок изменчивости массы аргона

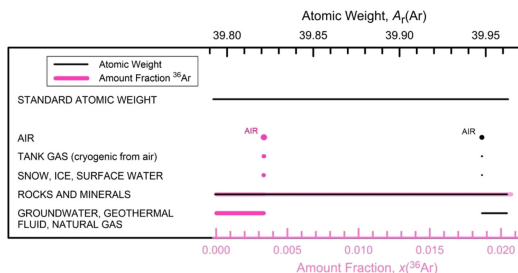


Рис. 4.4. Вариации атомного веса (чёрные линии) аргона, $A_r(\text{Ar})$, и значения долей (розовые линии) изотопа ^{36}Ar , $\chi(^{36}\text{Ar})$, для некоторых веществ

Вариации состава стабильных изотопов и атомного веса аргона вызваны несколькими причинами, в том числе

(1) производство изотопов аргона из других элементов путем радиоак-

тивного распада (радиогенные изотопы) или другие ядерные превращения (нуклеогенные изотопы), и

(2) изотопное фракционирование с помощью физико-химических процессов, таких как диффузия или фазовое равновесие.

Физико-химические процессы вызывают коррелированные зависимости от массы вариации отношений изотопов аргона $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$ и $n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$, где относительная вариация $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$ примерно вдвое превышает вариацию $n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$ из-за двукратного различия масс изотопов.

Напротив, процессы ядерной трансформации вызывают изменения, которые не следуют этой модели. Например, процесс рождения ^{40}Ar , изменит отношение $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$, но не $n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$; процесс рождения ^{36}Ar привел бы к одинаковым относительным изменениям как $n(^{40}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$, так и $n(^{38}\text{Ar})/n(^{36}\text{Ar})$.

В то время как атмосферный аргон может служить обильным и однородным изотопным эталоном, отклонения от атмосферных изотопных отношений в других источниках аргона ограничивают точность. Опубликованные данные указывают на изменение атомного веса аргона в нормальных земных условиях материалы 39.792 и 39.963 [55]. Верхний конец этого интервала соответствует атомному весу (относительная атомная масса) ^{40}Ar , поскольку некоторые образцы минералов, богатых калием, содержат почти чистый радиогенный ^{40}Ar . Атомный вес чистого аргона-40, $A_r(^{40}\text{Ar}) = 39.962383$, был округлен до 39.963 для соответствия стандартному атомному весу аргона. Нижняя граница стандартного атомного веса аргона даёт образец *настурана* (урановая руда из Саскачевана, Канада), содержащий большое количество нуклеогенных изотопов ^{36}Ar и ^{38}Ar [57]. Эти измерения были откалиброваны по атмосферному аргону.

Предлагаемая ячейка в Таблице IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes [54] приведена на Рис. 4.5.

Для надёжности, если предположить оба соотношения изотопов как независимые и имеющие расширенную относительную неопределенность на 0.5 % для согласования с рекомендованными в 2007 г. значениями отношения изотопов в атмосферном аргоне, получаем изотопные отношения $R(^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}) = 2.09 \pm 0.01$ и $R(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}) = 45.2 \pm 0.22$ и атомный вес $A_r(\text{Ar}) = 39.7931 \pm 0.0009$ ($k = 2$), что дает нижнюю границу стандартного атомного веса аргона $39.7931 - 0.0009 = 39.792$.

В пределах стандартного интервала атомного веса аргона измерения различных изотопов отношения $R(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})$ или $R(^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})$ с

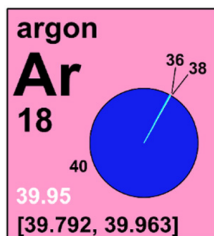


Рис. 4.5. Представление аргона в таблице Менделеева

различными уровнями точности широко используются для исследований в геохронологии, взаимодействие воды с горными породами, эволюция атмосферы и другие области [55]. Если требуется одно значение атомного веса, Комиссия рекомендует использовать 39.95 ± 0.16 , что соответствует аргону в воздухе с неопределённостью, которая обеспечивает покрытие «нормальных» материалов (см. стр. 102).

В более широком контексте, обзор измерений весов благородных газов в атмосфере дан в публикации [60].

В завершение представим таблицу IUPAC молярных интервалов изотопов аргона.

Изотоп	Отн. ат. масса	Молярная доля	Солнце [56] %
^{36}Ar	35.967 5451	[0.0000, 0.0208]	84.6
^{38}Ar	37.962 732	[0.0000, 0.0433]	15.4
^{40}Ar	39.962 383 12	[0.936, 1.000]	0.02

Таблица 4.1. Молярные интервалы изотопов аргона

Как видно из Табл. 4.1 интервалы изменчивости изотопного состава на Земле очень велики. Так же видна колоссальная разница с данными по Солнцу. Содержание «земного» изотопа аргона ^{40}Ar на Солнце ничтожно.

4.2 Свинец

Свинец, в отличие от аргона (§4.1), известен человеку многие тысячелетия. Этот металл широко распространён, легко добывается и обрабатывается.

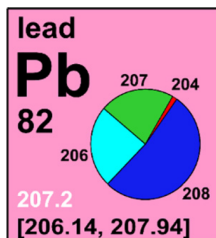
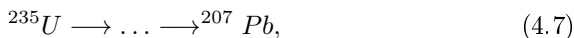
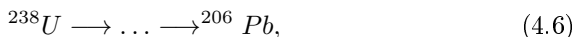


Рис. 4.6. Представление свинца в таблице Менделеева

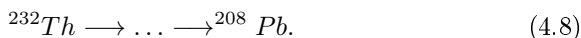
Как видно из Рис. 4.6, изотопный портрет свинца весьма богат. При этом плотность свинца в различных материалах имеет рекордную изменчивость. Она настолько велика, что превышает единицу величины атомной массы. Эта разница была обнаружена даже при использовании весьма скромных по точности средств измерения.

4.2.1 Происхождение изотопов свинца

Изотопный состав и атомный вес свинца в земных материалах различны, поскольку три его самых тяжелых стабильных изотопа являются стабильными конечными продуктами радиоактивного распада различных изотопов урана



и тория



Представим графически цепочки процессов, соответствующих образованию изотопов свинца согласно (4.6) — (4.8). Для этого воспользуемся данными с сайта <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>.

На Рис. 4.7 представлена часть NZ -диаграммы с отображением моды распада ядра цветом. Пурпурный цвет отвечает *электронному*

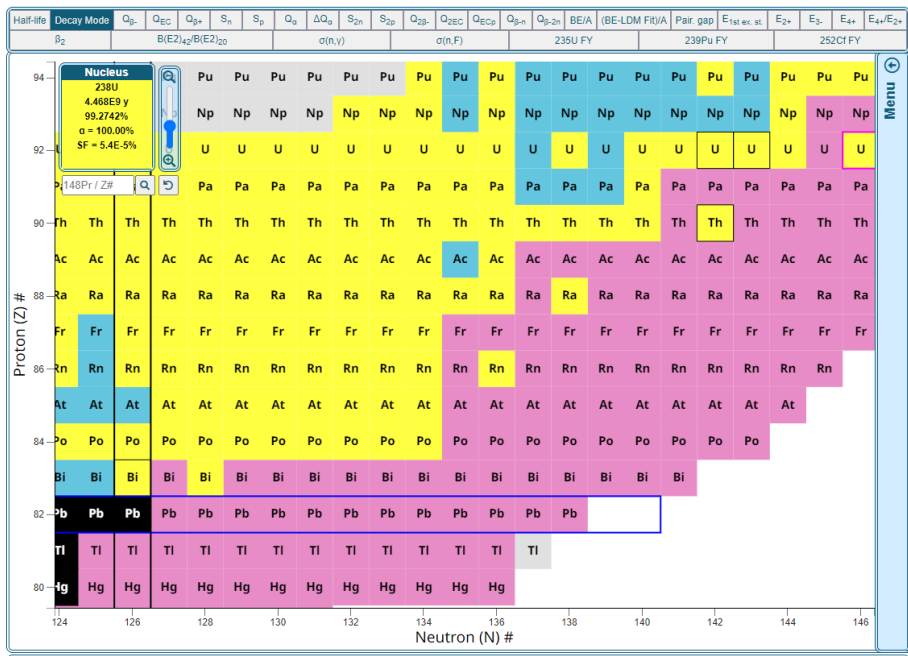


Рис. 4.7. Виды распадов от урана до свинца
— по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

бета-распаду, жёлтый цвет соответствует *альфа-распаду*. Область отображения в координатах (N, Z) выбрана таким образом, что в правом верхнем угле находятся исходные изотопы реакций (4.6)—(4.8). В левом нижнем угле расположены конечные элементы этих цепочек ядерных реакций.

Пользуясь правилами изменения числа протонов и нейтронов при указанных способах распада — см. §1.1.4, можно построить весь путь прохождения процессов, данных формулами реакций (4.6)—(4.8).

Ряд тория. Радиоактивный ряд нуклидов с массовым числом, представимым в виде $4n$, называется *рядом тория*. Ряд начинается с встречающегося в коре Земли ^{232}Th и завершается образованием стабильного ^{208}Pb .

Можно заметить по Рис. 4.7, начало и вся цепочка процессов не

содержит стабильных изотопов, кроме завершающего элемента. Таким образом, непонятно, как она вообще могла быть инициирована. Для пояснения этого вопроса вспомним (§1.1.1, §2.7.1), что стабильность ядер — понятие относительное. При наличии на Земле большого количества исходного радиоактивного элемента и сравнимого с геологическими временами периода полураспада, эти процессы будут протекать и поныне, а сам исходный элемент по-прежнему будет в значимых количествах присутствовать в природных элементах.

Поэтому, извлечём данные по относительной распространённости изотопов тяжёлых элементов из <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/> и построим Рис. 4.8 в координатах (A, Z) . Здесь $A = N + Z$ — полное число нуклонов в ядре. Это в данном случае более удобно, поскольку в научной печати для изотопов обычно приводится заряд и полное число нуклонов, а не количество нейтронов. Кроме того, следует заметить, что цветовая легенда на Рис. 4.8 отвечает относительной распространённости изотопов для данного элемента и ничего не говорит об его *абсолютном количестве* на Земле.

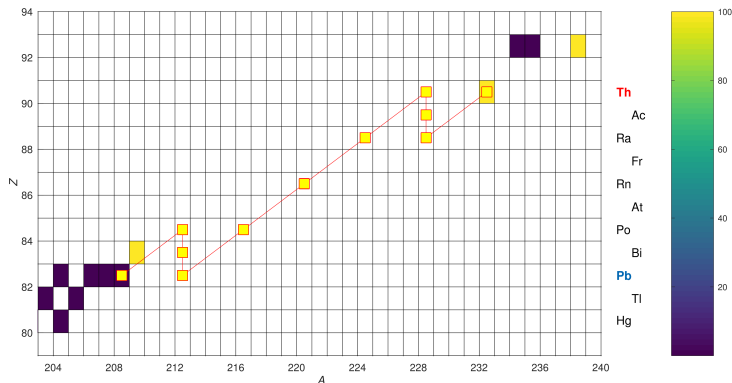


Рис. 4.8. Серия тория
— по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

На рис. 4.8 вертикальные линии соответствуют β^- -распадам. В таких процессах атомный вес практически неизменен. Наклонные линии соответствуют α -распадам с одновременным изменением атомного веса на 4 и на электрического заряда — на 2. В конкретном случае можно

Z	90	88	89	90	88	86	84
A	232	228	228	228	224	220	216
Изотоп	^{232}Th	^{230}Ra	^{227}Ac	^{228}Th	^{224}Ra	^{223}Rn	^{217}Po
Z				82	83	84	82
A				212	212	212	208
Изотоп				^{213}Pb	^{212}Bi	^{212}Po	^{208}Pb

Таблица 4.2. Изотопы в ряду тория

символически записать переход от начального изотопа к конечному и баланс весов и электрических зарядов:

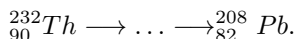
$$^{232}_{90}\text{Th} \longrightarrow ^{208}_{82}\text{Pb} + 6\alpha + 4\beta^{-}, \quad (4.9)$$

$$A: \quad 232 = 208 + 4 \cdot 6, \quad (4.10)$$

$$Z: \quad 90 = 82 + 2 \cdot 6 - 4. \quad (4.11)$$

Здесь учтено, что $Z_{\beta} = -1$, $Z_{\alpha} = +2$, $A_{\beta} \approx 0$, $A_{\alpha} = 4$.

Прокомментируем график цепочки радиоактивных распадов (4.8)



В первую очередь, обратим внимание на стартовую позицию в цепочке (4.8). Это — изотоп ^{232}Th с периодом полураспада около 14 миллиардов лет. Таким образом, он обладает достаточно большим периодом полураспада по отношению к возрасту Земли (см. §2.7.2), поэтому практически весь природный торий состоит только из этого нуклида. Можно также заметить, что общие запасы тория в 3–4 раза превышают запасы урана в земной коре.

Всего между изотопом тория ^{232}Th и изотопом свинца ^{208}Pb находится 9 изотопов различных элементов. Все они нестабильны и не накапливаются в значимых количествах на Земле.

Таким образом, график на Рис. 4.8 отражает современное состояние и в качественном смысле будет оставаться неизменным в течение очень длительного периода.

Как было замечено в начале обсуждения данной цепочки ядерных превращения на стр. 109, были допущены некоторые упрощения. Они состоят в том, что игнорируются минорные (маловероятные) конкурирующие процессы распадов. Они приводят к ветвлению процессов, но в конечном счете так же завершаются в ^{208}Pb .

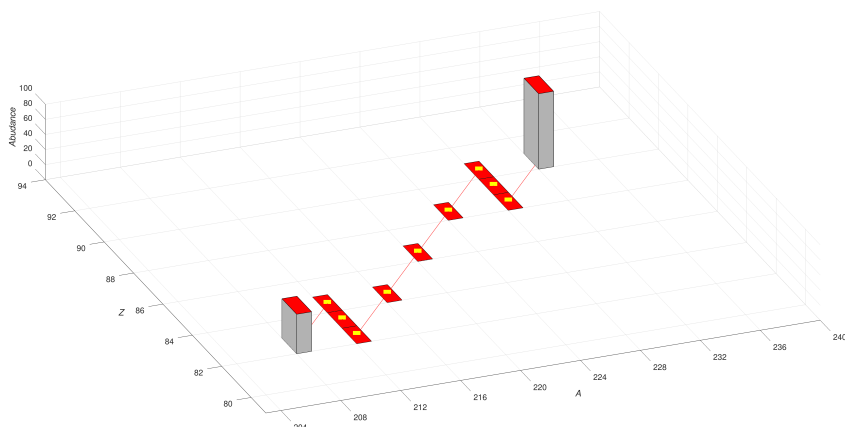


Рис. 4.9. Серия тория, трёхмерное представление
— по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

Ряды радия и актиния. Рассмотрим теперь совсем кратко цепочки ядерных превращений, приводящих к образованию изотопов свинца с атомными массами 206 и 207.

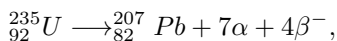
Радиоактивный ряд нуклидов с массовым числом, представимым в виде $4n+2$, называется *рядом радия* (иногда называют рядом урана или урана-радия). Ряд начинается с урана-238 и завершается образованием стабильного свинца-206.

Для ряда радия можно записать упрощённую схему распада и балансовые отношения для атомного веса и электрического заряда, аналогично случаю для ряда тория (4.9), (4.10) и (4.11)

$$\begin{aligned} {}_{92}^{238}\text{U} &\longrightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6\beta^{-}, \\ A: \quad 238 &= 206 + 4 \cdot 8, \\ Z: \quad 92 &= 82 + 2 \cdot 8 - 6. \end{aligned}$$

Радиоактивный ряд нуклидов с массовым числом, представимым в виде $4n+3$, называется *рядом актиния* или урана-актиния. Ряд начинается с урана-235 и завершается образованием стабильного свинца-207.

Балансовые отношения для ряда актиния можно записать как



$$A: \quad 235 = 207 + 4 \cdot 7,$$

$$Z: \quad 92 = 82 + 2 \cdot 7 - 4.$$

Все ряды создания стабильных радиогенных изотопов свинца.

Приведём общую картину всех трёх цепочек создания стабильных радиогенных изотопов свинца.

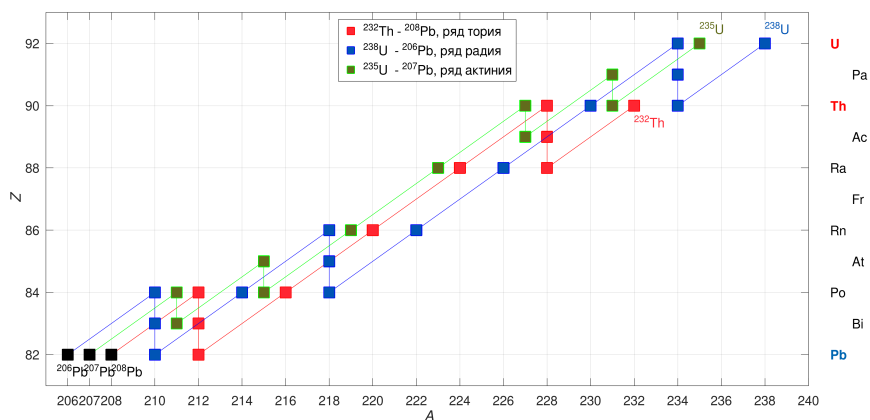


Рис. 4.10. Ряды тория, радия и актиния — основные ветви
— по данным <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

На рис. 4.10 схематично представлены основные ветви рядов тория, радия и актиния. Например, из распадов ${}^{212}\text{Bi}$ (1.2) и (1.3) в ряду тория учитывался только (1.2), как наиболее вероятный. Распространённость исходных изотопов также не учитывалась.

За исключением конечных продуктов, изотопов свинца, все транзитные изотопы в рядах нестабильны. Если посмотреть на рис. 4.7, то можно заметить, что ${}^{208}\text{Pb}$ является самым тяжёлым стабильным изотопом. В частности, все изотопы висмута 210-212, содержащиеся в рядах, неустойчивы к бета-распаду. То же относится к изотопам свинца 210 и 212.

На рис. 4.11 показан ряд актиния с учётом минорных ветвей. Использована интерактивная программа J. Williams and J. Donev, кото-

рая, в свою очередь, использует табличные данные с ресурса МАГАТЭ <https://www-nds.iaea.org/relnsd/NdsEnsdf/QueryForm.html>.

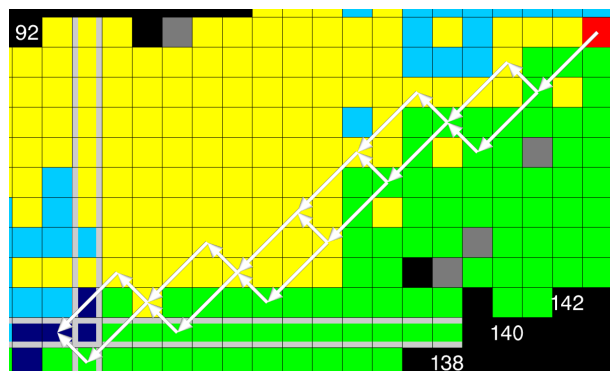


Рис. 4.11. Ряд актиния в координатах (N, Z)— все ветви
— <https://energyeducation.ca/simulations/nuclear/nuclidechart.html>

Подобные графики можно построить для всех рядов.

4.2.2 Изотопы свинца на Земле

Эти различия в соотношениях изотопов и атомных весах дают полезную информацию во многих областях науки, включая геохронологию, археологию, исследования окружающей среды и изучение окружающей среды, криминалистике.

В ходе всестороннего обзора нескольких сотен публикаций и анализов более 8000 образцов [58], опубликованные изотопные данные показывают, что самый низкий атомный вес свинца среди обычных земных материалов составляет 206.1462 ± 0.0028 ($k = 2$), определен для роста фосфатного минерала монацита из люизианских комплексов на северо-западе Шотландии, который содержит в основном ^{206}Pb и почти не содержит ^{204}Pb . Самый высокий из опубликованных атомный вес свинца 207.9351 ± 0.0005 ($k = 2$) для монацита из микровключений из люизианского комплекса на северо-западе Шотландии, содержащего практически чистый радиогенный ^{208}Pb .

Используя вышеупомянутые атомные веса свинца как нижнюю и верхнюю границы интервала, стандартный атомный вес свинца принят как $A_r(\text{Pb}) = [206.14, 207.94]$. Если требуется одно значение атомного веса, Комиссия рекомендует использовать интервал

207.2 ± 1.1 , что соответствует внешней оценке неопределенности для нормальных материалов.

$$A_r(Pb) = [206.14, 207.94]; \quad 207.2 \pm 1.1. \quad (4.12)$$

Предлагаемая ячейка в Таблице IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes [54] приведена на Рис. 4.6 со значением середины интервала атомного веса 207.2, данным белым цветом.

На Рис. 4.12 представлены данные по распределению изотопа ^{204}Pb в различных химических формах и разного происхождения.

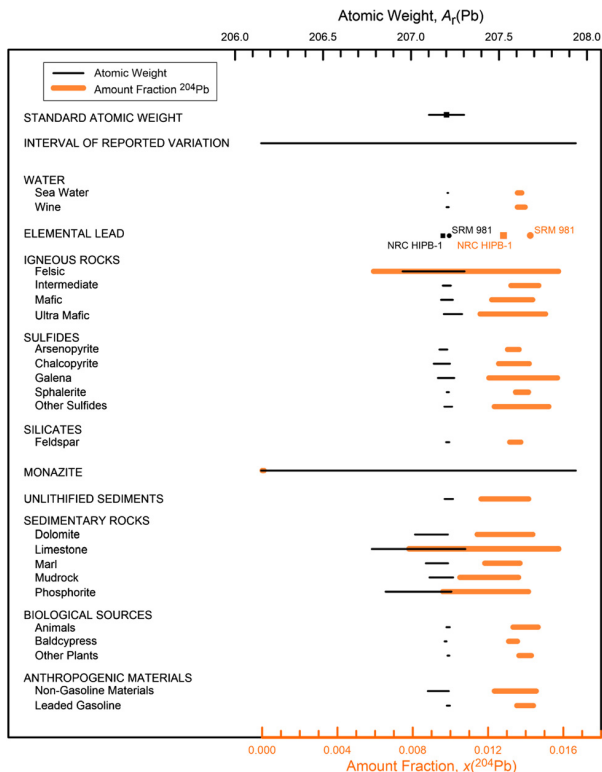


Рис. 4.12. Вариации изотопа ^{204}Pb в различных объектах

Рассмотрим часть данных, относящихся к свинцу природных объектов. Данные Табл.4.3 взяты из [58].

Категория	Нижняя граница	Верхняя граница
Доломит	0.0115	0.0136
Известняк	0.0078	0.0160
Мергель	0.0118	0.0137
Алевриты	0.0113	0.0131
Фосфориты	0.0096	0.0140

Таблица 4.3. Вариации изотопа ^{204}Pb в осадочных породах,
 $\chi^{204}Pb$.

Глава 5

Описание изотопных данных

Излагаемый материал значительно более подробно представлен в учебном пособии «Интервальные арифметики и прослеживаемость изотопной подписи» [45].

Для математического описания и обработки данных используется интервальный анализ. Кратко представлены понятия, методы и инструменты анализа данных с интервальной неопределённостью применительно к тематике изотопов. Для вычислений применяется арифметика твинов в форме Нестерова.

Предложен способ описания изотопных данных в виде твинов с целью прослеживания биохимического происхождения сложных веществ непосредственно по их молярной массе. Установлен критерий возможности прослеживания изотопной подписи из исходных категорий веществ в различных классах сложных органических соединений.

5.1 Интервальный анализ

Описание неопределённостей с помощью интервалов имеет ряд уникальных достоинств. В этом разделе представлена краткая информация о классической интервальной арифметике и анализе данных с интервальной неопределённостью (иначе, интервальной статистике).

Также понадобятся сведения о расширениях классической интер-

вальной арифметики $\mathbb{IR}$, которые можно использовать для описания изотопных данных. Нам понадобится полная интервальная арифметика Каухера $\mathbb{KR}$, которая преодолевает ряд трудностей классической интервальной арифметики и позволяет естественным образом работать с непересекающимися интервалами и использовать полную мощь минимаксных методов.

Для работы со структурами данных при обработке выборок понадобятся объекты, основанные на интервалах: объединения интервалов — мультиинтервалы, интервалы с интервальными вершинами — твины.

5.1.1 Классическая интервальная арифметика $\mathbb{IR}$

Вещественные интервалы. Первичное понятие интервального анализа данных и интервальной статистики — *интервал*. Это простое подмножество множества всех вещественных (действительных) чисел, которое задаёт целый диапазон значений интересующей нас величины. С помощью интервалов можно описывать и моделировать неопределённости и неоднозначности.

Интервалы могут определяться на вещественной оси, на комплексной плоскости, а также в многомерных пространствах. Кроме того, существуют различные определения интервалов, и некоторые из них не равносильны друг другу, задавая разные математические объекты. Далее нас будут интересовать, главным образом, вещественные интервалы, вещественные интервальные векторы и матрицы, так как именно они играют главную роль в измерениях и их обработке.

Определение 5.1.1 *Интервалом $[a, b]$ вещественной оси $\mathbb{R}$ называется множество всех чисел, расположенных между заданными числами a и b , включая их самих, т. е.*

$$[a, b] := \{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}.$$

При этом a и b называются концами интервала $[a, b]$, левым (или нижним) и правым (или верхним) соответственно.

Характеристики интервала. Любой интервал полностью задаётся двумя числами — своими концами, но на практике широко используются также другие характеристики интервалов и представления интервалов на их основе.

Важнейшими характеристиками интервала являются его *середина* (центр)

$$\text{mid } \mathbf{a} = \frac{1}{2}(\bar{\mathbf{a}} + \underline{\mathbf{a}}),$$

и его *радиус*

$$\text{rad } \mathbf{a} = \frac{1}{2}(\bar{\mathbf{a}} - \underline{\mathbf{a}}).$$

Также используется понятие *ширины* интервала

$$\text{wid } \mathbf{a} = \bar{\mathbf{a}} - \underline{\mathbf{a}}.$$

Таким образом, задание середины и радиуса интервала также однозначно определяет его, чем часто пользуются и в теории, и на практике.

Середина интервала — это точка, которая «представляет его» наилучшим образом, так как наименее удалена от остальных точек этого интервала.

Радиус и ширина характеризуют разброс (рассеяние) точек интервала. Интервалы нулевой ширины обычно называют *вырожденными*. Они отождествляются с вещественными числами, то есть, $[1, 1]$ — это то же самое, что и 1.

Отношения между интервалами. Интервалы являются множествами, и для них определены теоретико-множественные отношения и операции (объединение, пересечение и др.). Особенно важно отношение включения одного интервала в другой:

$$\mathbf{a} \subseteq \mathbf{b} \text{ равносильно тому, что } \underline{\mathbf{a}} \geq \underline{\mathbf{b}} \text{ и } \bar{\mathbf{a}} \leq \bar{\mathbf{b}}. \quad (5.1)$$

Отношение включения является частичным порядком и превращает множество интервалов в частично упорядоченное множество (см. [63]).

Важную роль играет линейное упорядочение интервалов:

Определение 5.1.2 Для интервалов $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{IR}$ условимся считать, что $\mathbf{a}$ не превосходит $\mathbf{b}$ и писать « $\mathbf{a} \leq \mathbf{b}$ » тогда и только тогда, когда $\underline{\mathbf{a}} \leq \underline{\mathbf{b}}$ и $\bar{\mathbf{a}} \leq \bar{\mathbf{b}}$.

Теоретико-множественные операции над интервалами. Если интервалы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ имеют непустое пересечение, т. е. $\mathbf{a} \cap \mathbf{b} \neq \emptyset$, то можно

дать простые выражения для результатов теоретико-множественных операций пересечения и объединения через концы этих интервалов

$$\mathbf{a} \cap \mathbf{b} = [\max\{\underline{a}, \underline{b}\}, \min\{\bar{a}, \bar{b}\}],$$

$$\mathbf{a} \cup \mathbf{b} = [\min\{\underline{a}, \underline{b}\}, \max\{\bar{a}, \bar{b}\}].$$

Если же $\mathbf{a} \cap \mathbf{b} = \emptyset$, т. е. интервалы $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ не имеют общих точек, то эти равенства уже неверны.

Обобщением операций пересечения и объединения являются операции взятия точной нижней грани и точной верхней грани относительно включения « $\subseteq$ »:

$$\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} = [\max\{\underline{a}, \underline{b}\}, \min\{\bar{a}, \bar{b}\}], \quad (5.2)$$

$$\mathbf{a} \vee \mathbf{b} = [\min\{\underline{a}, \underline{b}\}, \max\{\bar{a}, \bar{b}\}]. \quad (5.3)$$

Точная нижняя грань не обязательно присутствует во множестве, в отличие от минимума по множеству.

Операции (5.2) и (5.3) используются при обработке интервальных данных — §??.

Классическая интервальная арифметика Определение операций между интервалами производится через результаты операций между их членами, т. е. «по представителям». Именно, результат интервальной операции есть множество всевозможных результатов операции между числами из интервалов. Для двухместной операции « $\star$ » имеем

$$\mathbf{a} \star \mathbf{b} = \{a \star b \mid a \in \mathbf{b}, b \in \mathbf{b}\}. \quad (5.4)$$

Аналогично определяются интервальные одноместные операции.

Если рассматриваются арифметические операции, т. е. $\star \in \{+, -, \cdot, /\}$, то множества, задаваемые правилом (5.4), тоже являются интервалами. Для конкретных арифметических операций имеем формулы:

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}], \quad (5.5)$$

$$\mathbf{a} - \mathbf{b} = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}], \quad (5.6)$$

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = [\min\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}, \max\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}], \quad (5.7)$$

$$\mathbf{a}/\mathbf{b} = \mathbf{a} \cdot [1/\bar{b}, 1/\underline{b}] \quad \text{для } \mathbf{b} \neq 0. \quad (5.8)$$

Множество всех интервалов вещественной оси с операциями сложения, вычитания, умножения и деления, определёнными формулами (5.5)–(5.8), называется *классической интервальной арифметикой*, и его обозначают $\mathbb{IR}$.

5.1.2 Полная интервальная арифметика (Каухера)

$\mathbb{KR}$

Элементами арифметики $\mathbb{KR}$ являются пары чисел вида $[\alpha, \beta]$. Если $\alpha \leq \beta$, то $[\alpha, \beta]$ обозначает обычный интервал вещественной оси, и его называют *правильным*. Если же $\alpha > \beta$, то $[\alpha, \beta]$ — *неправильный интервал*. Таким образом, $\mathbb{IR} \subset \mathbb{KR}$.

Правильные и неправильные интервалы, две «половинки» $\mathbb{KR}$, переходят друг в друга в результате отображения *дуализации*, которое обозначается символом **dual** и меняет местами (переворачивает) концы интервала, т. е.

$$\text{dual } \mathbf{a} := [\bar{\mathbf{a}}, \underline{\mathbf{a}}]. \quad (5.9)$$

Правильной проекцией интервала $\mathbf{a}$ из $\mathbb{KR}$ называют интервал, обозначаемый **pro a**:

$$\text{pro } \mathbf{a} = \begin{cases} \mathbf{a}, & \text{если } \mathbf{a} \text{ — правильный,} \\ \text{dual } \mathbf{a}, & \text{если } \mathbf{a} \text{ — неправильный.} \end{cases}$$

С помощью правильной проекции из произвольного интервала получается правильный.

Арифметические операции между интервалами в $\mathbb{KR}$ продолжают операции в $\mathbb{IR}$, их подробное описание можно найти в [67]. Умножение интервала из $\mathbb{KR}$ на число определяется совершенно так же, как и для обычных правильных интервалов.

Чрезвычайно важным в интервальной арифметике Каухера является обратимость арифметических операций. В частности, для любого интервала имеется противоположный ему, т. е. обратный по сложению. Для интервалов, не содержащих нуля, имеются обратные к ним по умножению. Для сложения (5.5) обратной операцией является не операция интервального вычитания (5.6), а операция, которую называют «алгебраическим вычитанием» и обозначают знаком $\ominus$:

$$\mathbf{a} \ominus \mathbf{b} = [\underline{\mathbf{a}} - \underline{\mathbf{b}}, \bar{\mathbf{a}} - \bar{\mathbf{b}}]. \quad (5.10)$$

Для любых интервалов $\mathbf{a}, \mathbf{b}$ из $\mathbb{KR}$ справедливы равенства

$$\mathbf{a} \ominus \mathbf{a} = 0, \quad (\mathbf{a} + \mathbf{b}) \ominus \mathbf{b} = \mathbf{a}, \quad (\mathbf{a} \ominus \mathbf{b}) + \mathbf{b} = \mathbf{a}.$$

Пример 5.1.1.

$$[1, 2] \ominus [1, 2] = [1, 2] + [-1, -2] = [1 - 1, 2 - 2] = [0, 0] = 0.$$

■

Полная интервальная арифметика Каухера $\mathbb{KR}$ пополняет классическую интервальную арифметику $\mathbb{IR}$ не только в алгебраическом смысле, но также и относительно естественного порядка по включению « $\subseteq$ ».

Определение 5.1.3 Для интервалов $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{KR}$ выполняется включение $\mathbf{a} \subseteq \mathbf{b}$, если

$$\underline{a} \geq \underline{b} \quad \text{и} \quad \bar{a} \leq \bar{b}.$$

Относительно введённого таким образом отношения включения в $\mathbb{KR}$ для любых двух интервалов существуют интервалы точной нижней грани и точной верхней грани по включению, т. е. результаты операций $\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}$ и $\mathbf{a} \vee \mathbf{b}$ всегда определены.

Пример 5.1.2.

$$[0, 1] \wedge [4, 5] = [4, 1], \quad [0, 1] \vee [4, 5] = [0, 5].$$

■

5.1.3 Составные интервальные объекты

Данные и результаты операций с ними можно описывать не только интервалами, но и более сложными объектами, которые поддерживают дополнительную функциональность.

Твины. В данных мы можем использовать интервал с интервальными концами — *твин*. Слово «твин» является акронимом английского выражения «twice interval», т. е. «двойной интервал». Впервые такие объекты были рассмотрены Э. Гарденьесом с коллегами в 80-х годах XX века [64]. Они назвали развитое ими направление Modal Interval Analysis — модальный интервальный анализ.

Твин можно представить в виде

$$X = [a, b] = [[\underline{a}, \bar{a}], [\underline{b}, \bar{b}]],$$

и в зависимости от того, как мы определяем понятия «больше или равно» и «меньше или равно», подразумевать под ним множество всех интервалов, больших или равных $[\underline{a}, \bar{a}]$ и меньших или равных $[\underline{b}, \bar{b}]$. Так как на множествах интервалов из $\mathbb{IR}$ и $\mathbb{KR}$ существуют частичные упорядочения « $\subseteq$ » и « $\leq$ », то, соответственно, возможны два типа твинов: « $\subseteq$ »-твины и « $\leq$ »-твины.

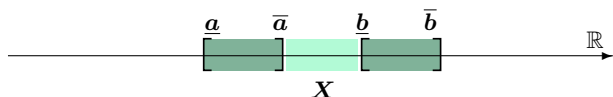


Рис. 5.1. Твины на вещественной оси

На рис. 5.1 твин X представлен в графической форме. Концы твина, т.е. интервалы a и b , представлены более темной заливкой, чем остальная часть твина.

В.М.Нестеров развил идеи твинов [65]. Особенно значимы его идеи о твинах, как способе одновременного вычисления внутренних и внешних оценок. Детали вычислений с твинами обсуждаются в [45].

Как представление твинов, так и работа с ними сложнее, чем с обычными интервалами. В настоящее время развиты программные средства, реализующие арифметику твинов [66]. Вычисления с использованием твинов для изотопных данных обсуждаются в [68], [69], [70].

Мультиинтервалы. В ряде разделов науки и техники встречаются ситуации, когда исследуемая величина содержится в неодносвязной области.

Согласно определению, приведённому в книге [67], *мультиинтервал* — это объединение конечного числа несвязных интервалов числовой оси (Рис. 5.2).



Рис. 5.2. Мультиинтервал в $\mathbb{R}$.

Между мультиинтервалами также могут быть определены арифметические операции «по представителям», аналогично тому, как это делается на множестве интервалов.

Мультиинтервалы возникают, в частности, при вычислении интервальной моды в случае мультимодальных распределениях изотопных данных см. Главу «Численные данные по изотопам биогенных элементов» §7, подробно — см. [45].

Глава 6

Численные данные по нуклеосинтезу и распространённости ИЗОТОПОВ ЭЛЕМЕНТОВ

6.1 Табличные данные по группам элементов

Приведём некоторые данные по нуклеосинтезу — Табл.4.1 в [18]. В дальнейшем будем сопоставлять эти данные с «Таблицей стандартных атомных весов 2021» табл. 3.5 §3.2.

Ниже в таблицах 6.2—6.12 приводятся данные по всем элементам таблицы Менделеева, в значимом количестве представленными в коре Земли и её атмосфере. Данные по искусственно синтезированным элементам и чрезвычайно редким элементам (технеций и прометий, см. §2.2.1) не приводятся.

Обозначения процессов нуклеосинтеза:

- I Элемент
- II Массовое число A
- III Содержание нуклида в % по отношению к общему количеству
элемента в настоящее время
- IV Процесс нуклеосинтеза
- V Распространённость нуклида (нормировано к $\text{Si} = 10^6$)
в эпоху образования Солнечной системы

Таблица 6.1. Распространённость нуклидов — Обозначения
столбцов

- U — космологический синтез до образования звёзд
- H — горение водорода
- CNO — горение водорода при высоких температурах (CNO-цикл)
- He — взрывное горение гелия
- C — взрывное горение углерода
- O — взрывное горение кислорода
- Si — взрывное горение кремния
- NSi — обогащённое нейтронами горение кремния
- E — статическое ядерное равновесие
- s — s-процесс. Продукты медленного захвата нейтронов
- r — r-процесс. Продукты быстрого захвата нейтронов
- p — p-процесс. Процессы на обеднённой нейтронами стороне
долины β -стабильности
- X — Дробление космическими лучами

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
H	1	99.9885		2.59×10^{10}
	2	0.0115	U	5.03×10^{15}
He	3	0.000134	U	1.03×10^6
	4	99.999866	H, U	2.51×10^9
Li	5			
	6	7.59	X	4.2
	7	92.41	X, H, U	51.4
Be	8			
	9	100	X	0.612
B	10	19.9	X	3.7
	11	80.1	X	15.1
C	12	98.93	He	7.11×10^6
	13	1.07	H	7.99×10^4
N	14	99.636	H	2.12×10^6
	15	0.364	H	7.78×10^3
O	16	99.757	He	2.12×10^6
	17	0.038	H	5900
	18	0.205	He, CNO	3.15×10^4
F	19	100	CNO	804
Ne	20	90.48	C	3.06×10^6
	21	0.27	He, CNO	7330
	22	9.25	He, CNO	2.25×10^5
Na	23	100	C	5.77×10^4
Mg	24	78.99	C	8.10×10^5
	25	10.00	C	1.03×10^5
	26	11.01	C	1.13×10^5
Al	27	100	C	8.46×10^4
Si	28	92.223	O, Si	9.22×10^5
	29	4.685	O	4.68×10^4
	30	3.092	O	3.09×10^4

Таблица 6.2. Распространённость нуклидов, H—Si

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
P	31	100	O	8300
S	32	94.99	O, Si	400258
	33	0.75	O, Si	3160
	34	4.25	O, Si	17800
	36	0.01	NSi (?)	72
Cl	35	75.76	O, Si	3920
	37	24.24	O, Si	1250
Ar	36	0.3336	O, Si	78400
	38	0.0629	O, Si	14300
	40	99.6035	s	22
K	39	93.2581	O, Si	3500
	40	0.0117	O, Si	6
	41	6.7302	O, Si	253
Ca	40	96.94	O, Si	58500
	42	0.647	Si, s	391
	43	0.135	Si, s	82
	44	2.09	Si, s	1260
	46	0.004	NSi (?)	2
	48	0.187	NSi (?)	113
Sc	45	100	Si, E	34.4
Ti	46	8.25	E	204
	47	7.44	E	184
	48	73.72	E	1820
	49	5.41	E	134
	50	5.18	E, NSi (?)	128
V	50	0.250	E	0.7
	51	99.750	E	285.7

Таблица 6.3. Распространённость нуклидов, P—V

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Cr	50	4.35	E	569
	52	83.789	E	11000
	53	9.501	E	1240
	54	2.365	E	309
Mn	55	75.76	E	9220
Fe	54	5.845	E	49600
	56	91.754	E	7.78×10^5
	57	2.119	E	18000
	58	0.282	E	2390
Co	59	100	E	2350
Ni	58	68.077	E	33400
	60	26.233	E	12900
	61	1.1399	E	559
	62	3.6346	E	1780
	64	0.9255	E	454
Cu	63	69.15	E	374
	65	30.85	E	167
Zn	64	49.17	E	630
	66	27.13	E, s	362
	67	4.04	E, s	53
	68	18.45	E, s	243
	70	0.61	E, s	8
Ga	69	60.108	E, s	22.0
	71	39.892	E, s	14.6
Ge	70	20.57	E, s	24.3
	72	27.45	E, s	31.7
	73	7.75	E, s	8.8
	74	36.50	E, s	41.2
	76	7.73	E, s	8.5

Таблица 6.4. Распространённость нуклидов, Cr—Ge

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
As	75	100	s, r	6.10
Se	74	0.89	p	0.60
	76	9.37	s	6.32
	77	7.63	s, r	5.15
	78	23.77	s	16.04
	80	49.61	s, r	33.48
	82	8.73	r	5.89
Br	79	50.69	s, r	5.43
	81	49.31	s, r	5.28
Kr	78	0.335	p	0.20
	80	2.286	s, p	1.30
	82	11.593	s	6.51
	83	11.500	s, r	6.45
	84	59.987	s, r	31.78
	86	17.729	r	9.61
Rb	85	72.17	s, r	5.121
	87	27.83	r	2.108
Sr	84	0.56	p	0.13
	86	9.86	s	2.30
	87	7.00	s	1.60
	88	82.58	s, r	19.2
Y	89	100	s, r	4.63
Zr	90	0.56	p	0.13
	91	9.86	s	2.30
	92	7.00	s	1.60
	94	82.58	s, r	19.2
	96	2.80	r	0.302

Таблица 6.5. Распространённость нуклидов, As—Zr

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Nb	93	100	s, r	0.780
Mo	92	14.53	p	0.370
	94	9.15	p	0.233
	95	15.84	s, r	0.404
	96	16.67	s	0.425
	97	9.60	s, r	0.245
	98	24.39	s, r	0.622
	100	9.82	r	0.250
	100	9.82	r	0.250
Ru	96	5.55	p	0.099
	98	1.87	p	0.033
	99	12.76	s, r	0.227
	100	12.16	s	0.224
	101	17.06	s, r	0.304
	102	31.55	s, r	0.562
	104	18.62	r	0.332
	104	18.62	r	0.332
Rh	103	100	s, r	0.370
Pd	102	1.02	p	0.00139
	104	11.14	s	0.1513
	105	22.33	s, r	0.3032
	106	27.33	s	0.371
	108	26.46	s, r	0.359
	110	11.72	r	0.159
	110	11.72	r	0.159
Ag	107	51.839	s, r	0.254
	109	48.161	s, r	0.236

Таблица 6.6. Распространённость нуклидов, Nb—Ag

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Cd	106	1.25	p	0.020
	108	0.89	p	0.014
	110	12.49	s	0.197
	111	12.80	s,r	0.201
	112	24.13	s, r	0.380
	113	12.22	s, r	0.192
	114	28.73	s, r	XXX
	116	7.49	r	0.118
In	113	4.29	p, s	0.008
	115	95.71	s, r	0.170
Sn	112	0.97	p	0.035
	114	0.66	p	0.024
	115	0.34	p, s, r	0.012
	116	14.54	s	0.524
	117	7.68	s, r	0.277
	118	24.22	s, r	0.873
	119	8.59	s, r	0.309
	120	32.58	s, r	1.175
	122	4.63	r	0.167
	124	5.79	r	0.209
Sb	121	57.21	s, r	0.179
	123	42.79	s, r	0.134

Таблица 6.7. Распространённость нуклидов, Cd—Sb

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Te	120	0.09	p	0.005
	122	2.55	s	0.122
	123	0.89	s	0.043
	124	4.74	s	0.226
	125	7.07	s, r	0.335
	126	18.84	s, r	0.889
	128	31.74	r	1.489
	130	34.08	r	1.585
I	127	100	s, r	1.10
Xe	124	0.0952	p	0.007
	126	0.0890	p	0.006
	128	1.9102	s	0.122
	129	26.4006	s, r	1.499
	130	4.0710	s	0.239
	131	21.232	s, r	1.190
	132	26.9086	s, r	1.438
	134	10.4537	r	0.527
Cs	136	8.8573	r	0.429
	133	100	s, r	0.371
Ba	130	0.106	p	0.005
	132	0.101	p	0.005
	134	2.417	s	0.108
	135	6.592	s, r	0.295
	136	7.854	s	0.351
	137	11.232	s, r	0.502
	138	71.698	s, r	3.205

Таблица 6.8. Распространённость нуклидов, Te—Ba

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
La	138	0.0881	p	0.000
	139	99.9119	s, r	0.457
Ce	136	0.185	p	0.002
	138	0.251	p	0.003
	140	88.450	s, r	1.043
	142	11.114	r	0.131
Pr	141	100	s, r	0.172
Nd	142	27.152	s	0.231
	143	12.174	s, r	0.103
	144	23.798	s, r	0.203
	145	8.293	s, r	0.075
	146	17.189	s, r	0.147
	148	5.756	r	0.049
	150	5.638	r	0.048
	151	11.24	s	0.030
Sm	144	3.07	p	0.008
	147	14.99	s, r	0.041
	148	11.24	s	0.030
	149	13.82	s, r	0.037
	150	7.38	s	0.020
	152	26.75	r	0.071
	154	22.75	r	0.60
	155	14.80	s, r	0.0533
Eu	151	47.81	s, r	0.0471
	153	52.19	s, r	0.0514
Gd	152	0.20	p	0.0007
	154	2.18	s	0.0078
	155	14.80	s, r	0.0533
	156	20.47	s, r	0.0736
	158	24.84	s, r	0.0894
	160	21.86	r	0.0787

Таблица 6.9. Распространённость нуклидов, La—Gd

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Tb	159	100	s, r	0.0634
Dy	156	0.056	p	0.0002
	158	0.095	p	0.0004
	160	2.329	s	0.0094
	161	18.889	s, r	0.0762
	162	25.475	s, r	0.1028
	163	24.896	s, r	0.1005
	164	28.260	s, r	0.1141
Ho	165	100	s, r	0.0910
Er	162	0.139	p	0.0004
	164	1.601	p, s	0.0042
	166	33.503	s, r	0.088
	167	22.869	s, r	0.060
	168	26.978	s, r	0.071
	170	14.910	r	0.039
Tm	169	100	s, r	0.0406
Yb	168	0.123	p	0.0003
	170	2.982	s	0.0076
	171	14.09	s, r	0.0361
	172	21.68	s, r	0.0556
	173	16.103	s, r	0.0413
	174	32.026	s, r	0.0821
	176	12.996	r	0.0333
Lu	175	0.123	s, r	0.0370
	176	2.599	s	0.0011

Таблица 6.10. Распространённость нуклидов, Tb—Lu

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Hf	174	0.16	p	0.0003
	176	5.26	s	0.0081
	177	18.60	s, r	0.0290
	178	27.28	s, r	0.0425
	179	13.62	s, r	0.0212
	180	35.08	s, r	0.0547
Ta	180	0.01201	s, r	0.0000026
	181	99.98799	s, r	0.0210
W	180	0.12	p	0.0002
	182	26.50	s, r	0.0363
	183	14.31	s, r	0.0196
	184	30.64	s, r	0.0420
	186	28.43	r	0.0390
Re	185	37.40	s, r	0.0207
	187	62.60	s, r	0.0374
Os	184	0.02	p	0.0001
	186	1.59	s	0.0108
	187	1.96	s	0.0086
	188	13.24	s, r	0.0904
	189	16.15	s, r	0.110
	190	26.36	s, r	0.0179
Ir	192	40.78	r	0.278
	191	37.3	s, r	0.250
	193	62.7	s, r	0.421

Таблица 6.11. Распространённость нуклидов, Hf—Ir

Символ	Атомный Вес	Содержание нуклида	Процесс нуклеосинтеза	Распростра нённость
I	II	III	IV	V
Pt	190	0.012	p	0.0002
	192	0.782	s	0.010
	194	32.86	s, r	0.420
	195	33.78	s, r	0.431
	196	25.21	s, r	0.322
	198	7.36	r	0.091
Au	197	100	s, r	0.195
Hg	196	0.15	p	0.001
	198	9.97	s	0.046
	199	16.87	s, r	0.077
	200	23.10	s, r	0.106
	201	13.18	s, r	0.060
	202	29.86	s, r	0.0137
	204	6.87	r	0.031
Tl	203	29.524	s, r	0.054
	205	70.476	s, r	0.129
Pb	204	1.4	s	0.066
	206	24.1	s, r	0.614
	207	22.1	s, r	0.680
	208	52.4	s, r	1.946
Bi	209	100	s, r	0.1382
Th	232	100	r	0.0440
U	234	0.0054	r	0.00000049
	235	0.7204	r	0.00058
	238	99.2742	r	0.0180

Таблица 6.12. Распространённость нуклидов, Pt—U

Глава 7

Численные данные по изотопам биогенных элементов

7.1 Измерения величины δ изотопов.

Обычно измерения изотопной дельты являются основой для определения атомного веса [59]. Величина δ изотопа получается из отношения числа изотопов $R(^{i/j}E)$ в веществе P :

$$R(^{i/j}E, P) = N(^iE, P)/N(^jE, P) \quad (7.1)$$

где $N(^iE, P)$ и $N(^jE, P)$ — число атомов каждого изотопа, а iE в общем случае обозначает наибольшее (верхний индекс i) и jE наименьшее (верхний индекс j) атомные массовые числа изотопов химического элемента E в веществе P . jE представляет эталонный изотоп, который не обязательно является изотопом с наименьшим атомным массовым числом.

Дельта-значение изотопов (символ δ), также называемое разностью относительных изотопных отношений, представляет собой дифференциальное измерение, полученное из соотношения изотопов вещества P и шкалы, представленной опорным материалом [50].

$$\delta_{\text{Ref}}(^{i/j}E, P) = R(^{i/j}E, P)/R(^{i/j}E, \text{Ref}) - 1. \quad (7.2)$$

Дельта-значения изотопов являются небольшими числами и поэтому часто представляются кратными 10^{-3} или промилле (символ ‰). Чтобы согласовать дельта-шкалу изотопов элемента со шкалой количеств изотопов, необходимо вещество, содержание изотопов и дельта-значения изотопов которых также хорошо известны. Обычно это вещество является изотопным эталонным материалом, который служит материалом «лучшего качества» (эталона) для определения содержания изотопов. Например, для углерода $\chi(^{13}\text{C})$ шкала содержания согласуется с $\delta_{\text{VPDB}}(^{13}/^{12}\text{C})$ посредством измерения изотопного эталона материал NBS 19 (карбонат кальция), которому было присвоено согласованное значение $\delta_{\text{VPDB}}(^{13}/^{12}\text{C}, \text{NBS19}) = +1.95\text{‰}$. Отношение числа изотопов углерода NBS 19 составляет $R(^{13}/^{12}\text{C}, \text{NBS19}) = 0.011202 \pm 0.000028$. Это измерение служит «наилучшим измерением одного наземного источника [51]. Белемнит Vienna Pee Dee (VPDB) является нулевой точкой на шкале дельта-изотопов углерода и, следовательно, $\delta_{\text{VPDB}}(^{13}/^{12}\text{C}, \text{VPDB}) = 0$. Поскольку $1\text{‰} = 0.001$, отсюда следует:

$$R(^{13}/^{12}\text{C}, \text{VPDB}) = 0.011202 / (1 + 1.95 \times 0.001) = 0.011180 \quad (7.3)$$

Таким образом, без учета неопределенности соотношение между значениями дельты изотопов углерода (δ) и ^{13}C составляет доли (χ) материала Р

$$\chi(^{13}\text{C}, P) = 1 / \left[1 + 1 / \left\{ R(^{13}/^{12}\text{C}, \text{VPDB}) \times [1 + \delta_{\text{VPDB}}(^{13}\text{C}, P)] \right\} \right] \quad (7.4)$$

Данные по изотопам конкретных элементов рис. 3.1 доступны по ссылке <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/580e719ae4b0f497e794b7d8> [52] в виде рисунков и численных данных. В интерактивной форме эти данные доступны с сайта <https://www.ciaaw.org/natural-variations.htm> [53]. Рассмотрим, как эти данные представляются и как извлекать численные данные.

7.2 Численные данные по изотопам водорода

Для изотопов водорода графически данные представлены на Рис. 7.1.

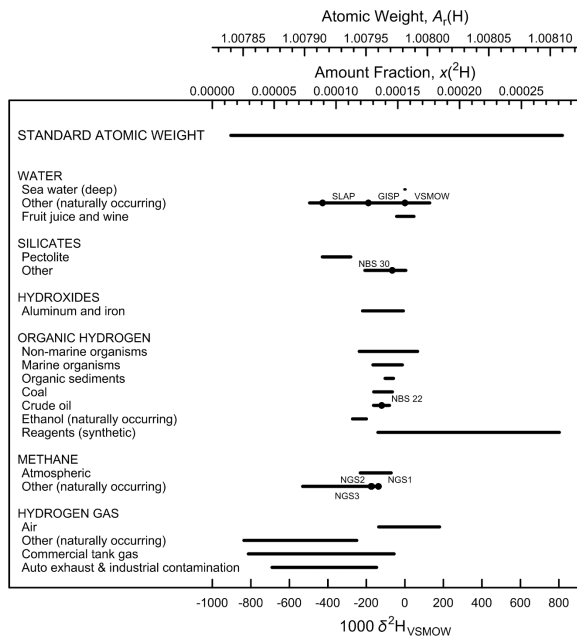


Рис. 7.1. Данные по изотопам водорода для различных веществ и в разных природных или искусственных окружениях [52]

Category	Subcategory	$\chi(^2H)$	$\overline{\chi(^2H)}$
Standard atomic weight		0,0000149	0,0002832
VSMOW		0,0001557	0,0001557
Water	Sea water (deep)	0,0001554	0,0001562
Water	Other (nat. occurring)	0,0000787	0,0001758
Water	Fruit juice and wint	0,000149	0,0001631
Methane	Atmospheric	0,0001196	0,0001447
Methane	Other (nat. occurring)	0,0000731	0,0001350

Таблица 7.1. Данные по изотопным вариациям для водорода

На Рис. 7.1 имеются три шкалы: атомные веса, изотопные распространённости и δ -отклонения относительно выбранного стандарта VSMOW, умноженные на 1000. (VSMOW - Vienna Standard Mean Ocean Water) [61].

Численные данные извлекаются с сайта или из .csv файла с указанных выше ресурсов. Как можно видеть из графического представления, в данных содержатся атомные веса, изотопные распространённости и δ -отклонения относительно выбранного стандарта VSMOW.

Данные отсортированы по категориям и подкатегориям. Рассмотрим категорию Water и три подкатегории: глубоководная морская вода, природная вода вообще и вода в напитках.

В табл. 7.2 приведены данные по верхним и нижним границам атомного веса водорода.

Category	Subcategory	<u>At.w.</u>	<u>At.w.</u>
Standard atomic weight		1.00784	1.00811
VSMOW		1.0079817	
Water	Sea water (deep)	1.0079814	1.0079823
Water	Other (nat. occurring)	1.0079042	1.0080020
Water	Fruit juice and wint	1.0079750	1.0079891
Methane	Atmospheric	1.0079454	1.0079706
Methane	Other (nat. occurring)	1.0078985	1.0079609

Таблица 7.2. Данные по вариациям атомной массы для водорода

В табл. 7.3 приведены данные по δ -отклонениям от стандарта VSMOW.

Category	Subcategory	<u>$\delta(^2H)$</u>	<u>$\delta(^2H)$</u>
Standard atomic weight		-904.5	818.9
VSMOW		0	
Water	Sea water (deep)	-2.5	3.2
Water	Other (nat. occurring)	-495	129
Water	Fruit juice and wint	-43	47
Methane	Atmospheric	-232	-71
Methane	Other (nat. occurring)	-531	-133

Таблица 7.3. Данные по δ -отклонениям от стандарта VSMOW для водорода

Приведённые Табл. 7.1-7.3 содержат необходимые сведения для расчёта масс молекул, содержащих водород в воде различного происхождения.

Для характеристики веществ наиболее выразительны данные Табл. 7.3. Именно такое представление относительно выбранного стан-

дарта используют специалисты предметных областей науки: геологи, биологи, археологи, палеонтологи и др.

7.3 Численные данные по изотопам углерода

В табл. 7.4 приведены данные по верхним и нижним границам атомного веса углерода. VPDB — стандартный материал Vienna Pee Dee Belemnite [62].

Category	Subcategory	$\overline{At.w.}$	$\overline{At.w.}$
Standard atomic weight		12.0096	12.0116
VPDB		12.011115	
Carbonate and bicarbonate	Sea water	1.0079814	1.0079823
Carbonate and bicarbonate	Other water	1.0079042	1.0080020
Methane	Air	12.010538	12.010665
Methane	Marine and other	12.009896	12.011233
Methane	Fresh water	12.010149	12.010545
Methane	Commercial tank gas	12.010534	12.010676

Таблица 7.4. Данные по вариациям атомной массы для углерода

У углерода имеется два стабильных изотопа, ^{12}C и ^{13}C . Более тяжёлый изотоп менее распространён, поэтому в справочных материалах обычно приводятся данные именно по нему.

В табл. 7.5 приведены данные по верхним и нижним границам δ -отклонениям от стандарта VPDB.

Category	Subcategory	$\delta(^{13}\text{C})$	$\overline{\delta(^{13}\text{C})}$
Standard atomic weight		-135.9	46.2
VPDB		0	
Carbonate and bicarbonate	Sea water	-0.8	2.2
Carbonate and bicarbonate	Other water	-37.1	37.5
Methane	Air	-50.6	-39
Methane	Marine and other	-109	12.7
Methane	Fresh water	-86	-50
Methane	Commercial tank gas	-51	-38

Таблица 7.5. Данные по вариациям атомной массы для углерода

Для изотопов углерода графически данные представлены на Рис. 7.2.

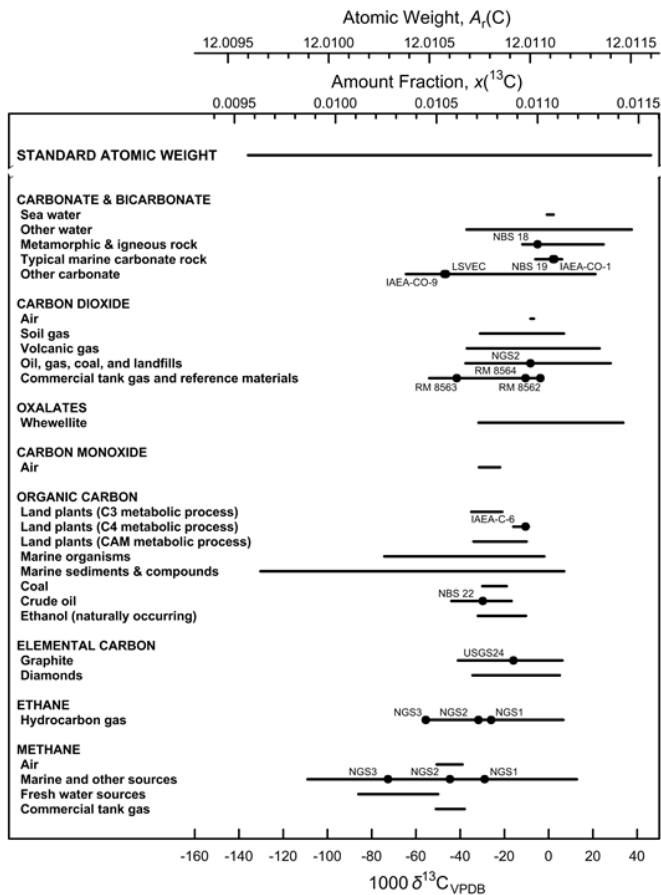


Рис. 7.2. Данные по изотопам углерода для различных веществ и в разных природных или искусственных окружениях [52]

7.4 Численные данные по изотопам кислорода

Для изотопов кислорода графически данные представлены на Рис. 7.3.

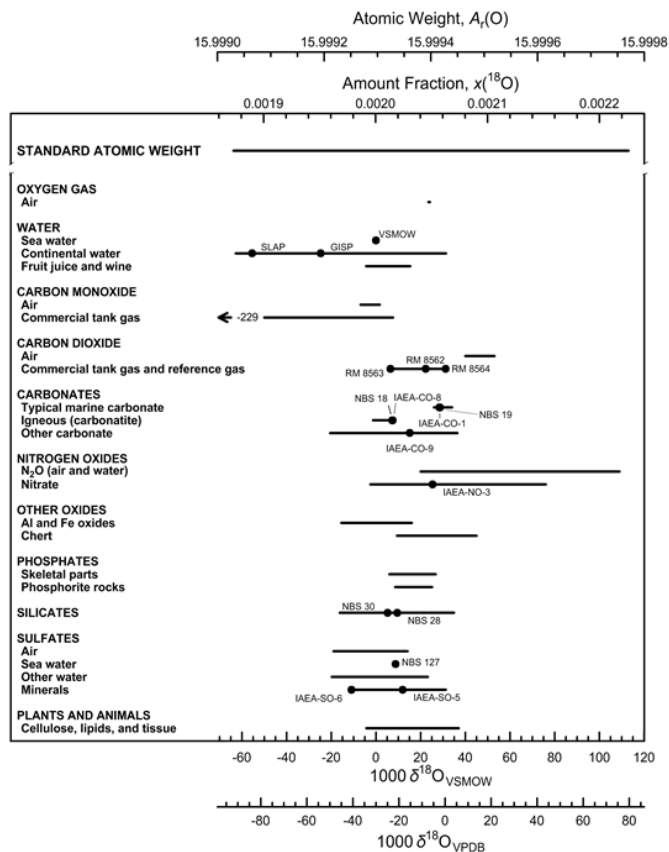


Рис. 7.3. Данные по изотопам кислорода для различных веществ и в разных природных или искусственных окружениях [52]

В табл. 7.6 приведены данные по верхним и нижним границам атомного веса кислорода.

Category	Subcategory	<u>At.w.</u>	<u>At.w.</u>
Standard atomic weight		15.9990291	15.99977
VSMOW		15.9993045	
Water	Sea water (deep)	15.9993003	1.0079823
Water	Other (nat. occurring)	15.9990406	1.0080020
Water	Fruit juice and wint	15.9992860	1.0079891

Таблица 7.6. Данные по вариациям атомной массы для кислорода

В табл. 7.7 приведены данные по δ -отклонениям от стандарта VSMOW.

Category	Subcategory	$\delta(^{18}H)$	$\overline{\delta(^{18}H)}$
Standard atomic weight		-65.5	111.3
VSMOW		0	
Water	Sea water (deep)	-1	0.6
Water	Other (nat. occurring)	-62.8	31.3
Water	Fruit juice and wint	-4.4	15.3

Таблица 7.7. Данные по δ -отклонениям от стандарта VSMOW для кислорода

Водород, кислород и углерод являются важнейшими биогенными элементами. Из атомов углерода образован «скелет» молекул живой природы — биогенные аминокислоты, водородные связи цементируют крупные молекулы белков, кислородное дыхание обеспечивает метаболизм на Земле, из водорода и кислорода состоит вода.

Заключение

В связи с расширением понимания свойств «химических элементов», классификация элементов по электрическому заряду была дополнена Международным союзом теоретической и прикладной химии IUPAC описанием свойств изотопов для каждого элемента — появилась и используется таблица Менделеева с интервальными значениями атомных весов.

Широкое использование изотопных данных мотивирует создание математических понятий, приёмов и программных инструментов для описания данных и проведения вычислений. Изотопные данные имеют свою специфику. IUPAC и Комиссией по изотопным и атомным весам CIAAW накоплен большой объём информации об изотопных подписях в виде интервалов. В настоящей публикации даны сведения по ядерной физике и ядерному нуклеосинтезу, необходимые для понимания происхождения изотопов и их различной распространённости в материи.

Что следует обсудить дальше? На сегодняшний день просматриваются следующие направления.

В каждой научной дисциплине важен исторический аспект. Для теории атома, а далее — атомного ядра помимо точных измерений весов, огромную роль сыграла спектроскопия. В XIX веке было собрано огромное количество спектральных данных элементов и веществ и произведены математические обобщения закономерностей в этих данных. Эта информация легла в основу создания квантовой механики через работы Планка и Бора. В дальнейшем спектроскопия осталась, наряду с масс-спектрометрией, основным методом изотопных исследований. Для пространственно недоступных объектов спектроскопия является сейчас и будет главным инструментом исследования. Эти вопросы необходимо осветить более подробно и доступно.

Физика элементарных частиц и ядерная физика дают описание

фундамента материи: атомных ядер и их «метаболизма»: взаимодействий и превращений (распадов). Строгое описание этих дисциплин весьма сложно и требует специальных знаний. Есть желание представить идеи и сведения максимально простым образом, с тем, чтобы читатель понял, как можно получать нужную информацию и уметь ей пользоваться на качественном уровне и делать простые численные оценки.

Получению и использованию изотопных распределений на Земле посвящено огромное количество теоретических и прикладных публикаций. Необходимо популярное объяснение основных закономерностей нуклеосинтеза, которое даёт исходный изотопный материал. Также хочется очертить группы химических элементов таблицы Менделеева и их изотопов по характеру их происхождения. Далее необходимо осветить процессы изотопного фракционирования в различных природных процессах. Речь идёт в первую очередь о геологии, палеонтологии и биологии, в т.ч. неземной.

Для математического представления, обработки и анализа изотопных данных необходимо развивать математические методы. В описательной статистике необходимо развитие и пропаганда методов, дающих содержательные внутренние и внешние оценки выборки данных, в том числе многомодальных и несовместных. Требуется дальнейшее развитие оценок соотношений множеств и мер совместности. В анализе зависимостей также необходимо развитие методов оценок параметров моделей общего вида, мультизначных и многомодальных. На всех этапах необходимо развитие программных средств представления и вычислений, с тем, чтобы у исследователя, обращающегося к данной тематике, уже на старте работ имелись базовые программные инструменты.

Литература

- [1] МЕНДЕЛЕЕВ, Д. (1869). “Соотношение свойств с атомным весом элементов”. Журнал Русского Химического Общества. 1: 60—77.
Д.И.Менделеев. Избранные сочинения. т. II АН СССР, ОНТИ - Гостхимтехиздат, Ленинградское отд. 1934, с.3-17.
- [2] MENDELEEV, DMITRI (1869). “Versuche eines Systems der Elemente nach ihren Atomgewichten und chemischen Functionen”. Journal für Praktische Chemie. 106: 251.
- [3] МЕНДЕЛЕЕВ, Д. (1870). “Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве”. Выписка из протокола заседания Русского Химического Общества. 3 декабря 1870 г.
- [4] ЛИСНЕВСКИЙ Ю.И. Атомные веса и возникновение ядерной физики. М., Наука, 1984, 255 с.
- [5] ТРИФОНОВ Д.Н., КРИВОМАЗОВ А.Н., ЛИСНЕВСКИЙ Ю.И. Учение о периодичности и учение о радиоактивности (комментированная хронология важнейших событий). М., Атомиздат, 1974, 248 с.
- [6] E. SCERRI The Periodic Table. Its Story and Its Significance. 2nd edition. New York, NY : Oxford University Press, 2019
- [7] В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, С.Ю.Комаров Атомные ядра. Учебное пособие. ISBN 978-5-91304-122-72010. –М., Университетская книга, 2010. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/anuc/index.html>
- [8] БЕКМАН, И. Н. Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующие излучения : учебник для вузов / И. Н. Бекман. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2022. — 493 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-08692-8.

- [9] Арбузов С.И. Геохимия изотопов. Лекции. Томский политехнический университет. https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SIARBUZOV/ucheb_rabota/Geochemistry/lecture/Lecture10.pdf
- [10] Mausolf, E.J.; Johnstone, E.V.; Mayordomo, N.; Williams, D.L.; Guan, E.Y.Z.; Gary, C.K. Fusion-Based Neutron Generator Production of Tc-99m and Tc-101: A Prospective Avenue to Technetium Theranostics. *Pharmaceuticals* 2021, 14, 875. <https://doi.org/10.3390/ph14090875>
- [11] Johnstone, E.V.; Yates, M.A.; Poineau, F.P.; Sattelberger, A.P.; Czerwinski, K.R. Technetium: The first radioelement on the Periodic Table. *J. Chem. Educ.* 2017, 94, 320–326.
- [12] C.F.V. Weizsacker Zur Theorie der Kernmassen. *Z.Phys.* 96 (1935) 431-458 DOI: 10.1007/BF01337700
- [13] Wang Meng et al 2017 *Chinese Phys. C* 41 030003 The AME2016 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. DOI 10.1088/1674-1137/41/3/030003
- [14] F.G. Kondev et al The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties 2021 *Chinese Phys. C* 45 030001 DOI 10.1088/1674-1137/abddae
- [15] National Nuclear Data Center at Brookhaven National Laboratory. NuDat application. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>
- [16] Описание формата данных ENSDF. Автор перевода: Г.И. Шуляк. Издательство: ПИЯФ РАН, Гатчина, 2006. http://cdfc.sinp.msu.ru/services/ensdfr/ensdfhelp_ru/ENSDF.html
- [17] Michael S. Smith. Nuclear data resources and initiatives for nuclear astrophysics November 2023 *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 10 DOI:10.3389/fspas.2023.1243615
- [18] Чечев В.П., Иванчик А.В., Варшалович Д.А. Синтез элементов во Вселенной: От Большого взрыва до наших дней URSS. 2020. 304 с. ISBN 978-5-9710-7626-1.
- [19] Бедняков В. А. О происхождении химических элементов. Э. Ч. А. Я., Том 33 (2002), Часть 4 стр.914-963.

- [20] Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, И.А. Тутынь. Нуклеосинтез во вселенной. М., Изд-во Московского университета. 1998. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt/index.html>
- [21] M. Arnould, S. Goriely, K. Takahashi, The r-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries, Physics Reports, Volume 450, Issues 4–6, 2007, Pages 97–213, ISSN 0370-1573, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2007.06.002>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157307002438>
- [22] L.-S. The, Mounib F. El Eid and B.S. Meyer. s-PROCESS NUCLEOSYNTHESIS IN ADVANCED BURNING PHASES OF MASSIVE STARS. The Astrophysical Journal, 655:1058Y1078, 2007 February 1
- [23] U. Ratzel, C. Arlandini, F. Käppeler, A. Couture, M. Wiescher, R. Reifarth, R. Gallino, A. Mengoni, and C. Travaglio. Nucleosynthesis at the termination point of the s process Phys. Rev. C 70, 065803 – Published 10 December 2004
- [24] H. Schatz, A.D.B. Reyes, A Best et al. Horizons: nuclear astrophysics in the 2020s and beyond. Journal of Physics G Nuclear and Particle Physics. Vol 49, No 11, November 2022 pp.1-78. DOI:10.1088/1361-6471/ac8890
- [25] Хейзен Роберт. Симфония №6: Углерод и эволюция почти всего. М.: Альпина нон-фикшн, 2021. — 288 с.
- [26] Хейзен Роберт. Роберт Хейзен: История Земли. От звездной пыли - к живой планете. Первые 4 500 000 000 лет. The Story of Earth. The First 4.5 Billion Years, from Stardust to Living Planet. М.: Альпина нон-фикшн, 2015. — 346 с.
- [27] R.M.Hazen, D.Papineau, W.Bleeker, R.T.Downs, J.M.Ferry, T.J.McCoy, D.A.Sverjensky, and H.Yang. Review Paper. Mineral evolution. American Mineralogist, Volume 93, pages 1693–1720, 2008. DOI: 10.2138/am.2008.2955 1693
- [28] E.S. Grew, and R.M. Hazen. Beryllium mineral evolution. American Mineralogist, Volume 99, pages 999–1021, 2014
- [29] П. Уорд, Д. КИРШВИНК Новая история происхождения жизни на Земле. – Питер. 2016. – 464 с.

- [30] Журавлев А.Ю. Сотворение Земли. Как живые организмы создали наш мир. М.: Альпина Пабlishер. ISBN 978-5-91671-902-4. 514 стр.
- [31] Brian Fry. *Stable Isotope Ecology*. 2006 Springer Science+Business Media, LLC. 390 pages. ISBN: 0387305130 ISBN-13(EAN): 9780387305134
- [32] Keith A. Hobson PhD (Editor), Leonard I. Wassenaar (Editor). *Tracking Animal Migration with Stable Isotopes*. Academic Press; 2nd edition (September 17, 2018), 268 pages
- [33] Чижевский А.Л. Земля в объятиях Солнца. — М.: Эксмо, 2004. — 928 с.
- [34] Т.Грегори. Метеориты. Космические камни, создавшие наш мир. - М.: Эксмо, 2023. - 288 с.
- [35] E.Krestianinov, Yu.Amelin, Q.-Z.Yin et al. Igneous meteorites suggest Aluminium-26 heterogeneity in the early Solar Nebula. *Nature Communications* (2023) 14:4940 p.1-11.
- [36] Ph.R.Heck, J.Greer, L.Kööpa et al. Lifetimes-of-interstellar-dust-from-cosmic-ray-exposure-ages-of-presolar-silicon-carbide. *PNAS*, January 13, 2020. 117 (4) 1884-1889 <https://doi.org/10.1073/pnas.1904573117>
- [37] В.Е.Жаров. Нутация неупругой Земли. О работе международного коллектива, удостоенной премии Декарта 2003 г. <https://www.astronet.ru/db/msg/1195760>
- [38] L.E. Lisiecki, M.E. Raymo. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic D18O records. *PALEOCEANOGRAPHY*, VOL. 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071, 2005
- [39] Amelin Y., Krot A. N. Pb isotopic age of the Allende chondrules. *Meteoritics & Planetary Science*, Volume 42, Issue 1321, pp. 1321-1335. 2007 DOI: 10.1111/j.1945-5100.2007.tb00577
- [40] Вегенер А. Возникновение материков и океанов / перевод с 3 немецкого издания, редактор Г. Ф. Мирчинк. Л.: Госиздат, 1925. XIV, 147 с. (Современные проблемы естествознания; Кн. 24).

- [41] И. ЯКОВЛЕВ. Изучение трофической структуры сообществ с помощью анализа стабильных изотопов. Дискуссионные лекции-семинары по эволюционной экологии, 08.11.2013
http://www.eco.nsc.ru/lectures/Iakovlev_Stable_Isotopes.pdf
- [42] ГРИЧУК Д.В. Геохимия стабильных изотопов. МГУ. 2022.
http://www1.geol.msu.ru/deps/geochems/rus/distance/gr_course_gch_t10-2.pdf
- [43] Васильев Г.И., Мелихова Е.С., Павлов А.К. ИЗОТОПНЫЕ СЛЕДЫ АКТИВНОСТИ РАННЕГО СОЛНЦА. XXVI Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца. Солнечная и солнечно-земная физика. г. Санкт-Петербург. 3-7 октября 2022
http://www.gaoran.ru/russian/publ-s/conf_2022/conf_2022.pdf
- [44] Планетология: учебное пособие / под ред. Н. И. Цидаевой; Сев.-Осет. гос. ун-т. Владикавказ: Изд-во СОГУ, 2015. – 232 с.
- [45] А.Н.Баженов. Интервальные арифметики и прослеживаемость изотопной подписи: учебное пособие. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. С.-Петербург, 2023.
<https://doi.org/10.18720/SPBPU/5/tr23-167>
- [46] MEIJA, J., COPLEN, T.B., BERGLUND, M., BRAND, W.A., DE BIEVRE, P., GRÖNING, M., HOLDEN, N.E., IRRGEHER, J., LOSS, R.D., WALCZYK, T., PROHASKA, T. Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry. – 2016. – Vol. 88, Issue 3. – P. 265–291. DOI: 10.1515/pac-2015-0305
- [47] AMDC — Atomic Mass Data Center <https://www-nds.iaea.org/amdc/>
- [48] Commission on Isotopic Abundances and Atomic Weights, CIAAW. <https://www.ciaaw.org/>
- [49] Thomas Prohaska, Johanna Irrgeher, Jacqueline Benefield, John K. Böhlke, Lesley A. Chesson, Tyler B. Coplen, Tipping Ding, Philip J. H. Dunn, Manfred Gröning, Norman E. Holden, Harro A. J. Meijer, Heiko Moossen, Antonio Possolo, Yoshio Takahashi, Jochen Vogl, Thomas Walczyk, Jun Wang, Michael E. Wieser, Shigekazu Yoneda, Xiang-Kun Zhu and Juris Meija.
Standard atomic weights of the elements 2021 (IUPAC Technical Report) Pure Appl. Chem. 2022; 94(5): 573–600

- [50] Brand, Willi A., Coplen, Tyler B., Vogl, Jochen, Rosner, Martin and Prohaska, Thomas. "Assessment of international reference materials for isotope-ratio analysis (IUPAC Technical Report)" *Pure and Applied Chemistry*, vol. 86, no. 3, 2014, pp. 425-467. <https://doi.org/10.1515/pac-2013-1023>
- [51] J. Meija, T. B. Coplen, M. Berglund, W. A. Brand, P. De Bièvre, M. Gröning, N. E. Holden, J. Irrgeher, R. D. Loss, T. Walczyk, T. Prohaska. *Pure Appl. Chem.* 88, 293 (2016).
- [52] T. B. Coplen, Y. Shrestha. *Tables and Charts for Isotope-Abundance Variations and Atomic Weights of Selected Elements: 2016* (Ver. 1.1, May 2018), U.S. Geological Survey Data Release (2018).
- [53] CIAAW. Commission on Isotopic Abundances and Atomic Weights. <https://ciaaw.org/natural-variations.htm>
- [54] Isotopes Matter, electronic version of the IUPAC Periodic Table of the Elements and Isotopes. <https://www.isotopesmatter.com>
- [55] J. K. Böhlke. *Pure Appl. Chem.* 86, 1421 (2014).
- [56] K. Lodders. SOLAR SYSTEM ABUNDANCES AND CONDENSATION TEMPERATURES OF THE ELEMENTS. *The Astrophysical Journal*, 591:1220–1247, 2003 July 10
- [57] J. Eikenberg, P. Signer, R. Wieler. *Geochem. Cosmochim. Acta.* 57, 1053 (1993).
- [58] X. K. Zhu, J. Benefield, T. B. Coplen, Z. Gao, N. Holden. *Pure Appl. Chem.* 93, 155 (2021).
- [59] T. B. Coplen, N. E. Holden, T. Ding, H. A. J. Meijer, J. Vogl, X. Zhu. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, e8864 (2020).
- [60] P. Burnard (ed.), *The Noble Gases as Geochemical Tracers, Advances in Isotope Geochemistry*, DOI: 10.1007/978-3-642-28836-4_2, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013
- [61] Vienna Standard Mean Ocean Water — VSMOW standard. https://en.wikipedia.org/wiki/Vienna_Standard_Mean_Ocean_Water
- [62] Vienna Pee Dee Belemnite — VPDB standard. <https://en.wikipedia.org/wiki/Δ13C>

- [63] ШРЕЙДЕР Ю.А. Равенство, сходство, порядок. — Москва: Наука, 1971.
- [64] GARDENES E., TREPAT A., JANER J.M. Approaches to simulation and to the linear problem in the SIGLA system // Freiburger Intervall-Berichte. — 1981. — No. 8. — S. 1–28.
- [65] НЕСТЕРОВ В.М. Твинные арифметики и их применение в методах и алгоритмах двустороннего интервального оценивания. дисс. ... д.ф.-м.н. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 1999, 234 с.
- [66] А.Г. Жаворонкова. Арифметика твинов Нестерова. `twin` — <https://github.com/Zhavoronkova-Alina/twin>
- [67] ШАРЫЙ С.П. Конечномерный интервальный анализ. — ФИЦ ИВТ: Новосибирск, 2023. Электронная книга, доступная на <http://www.nsc.ru/interval/Library/InteBooks/SharyBook.pdf>
- [68] Т.О. Яворук. Вычисления с изотопами `MendeleevTwin`. <https://github.com/Tatiana655/MendeleevTwin>
- [69] Д.Г. КОЖЕВНИКОВА. Применение твинов для вычислений с изотопными распределениями. Выпускная квалификационная работа бакалавра. С.-Петербург. 2023. <https://elib.spbstu.ru/dl/3/2023/vr/vr23-4186.pdf/info>
- [70] Tatiana Iavoruk and Alexander Bazhenov. The Use of Twins in Isotopic Analysis. IC-MSQUARE 2023 12th Int'l Conference on Mathematical Modeling in the Physical Sciences August 28-31, 2023. DOI:10.1007/978-3-031-52965-8_9

Предметный указатель

- W^- -бозон, 33
 α - и β -распады, 24
- Allan Hills 84001 — марсианский метеорит, 83
- d-кварк, 17
- Erg Chech 002, 87
- IUPAC, Международный союз теоретической и прикладной химии, 100
- Modal Interval Analysis, 122
- Murchison CM2, 87
- NA-диаграммы, 19
- NBS 19, карбонат кальция, 139
- NZ-диаграммы, диаграммы Серге, 18
- p-процесс, 63
- Periodic Table of the Elements and Isotopes — IPTEI, 100
- r-процесс, 48
- s-процесс, 47
- The International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC, 95
- u-кварк, 17
- VPDB, венский белемнит, 139, 142
- VSMOW, 140
- Девонский период, 91
- Менделеев, 13
- Пангея, 91
- Периодическая таблица Менделеева, 95
- Периодическая таблица элементов, 14
- Периодическая таблица элементов и изотопов, 14, 100
- Периодический закон, 13
- Солнечная система, 58
- ТМ, таблица Менделеева, 12
- альфа-распад, 32, 109
- атмосфера Земли, 59
- барн, 45
- бентос, 90
- бета-распад, 32, 104, 109
- благородные (инертные) газы, 103
- благородные металлы, 61
- бозоны, 17
- время жизни Вселенной, 86

геохронологическая
 (стратиграфическая)
 шкала, 88
 гидросфера, 58
 горные породы, 61
 дважды магические ядра, 24
 диаграмма Фейнмана, 17, 33
 долина стабильности атомных
 ядер, 18
 дуализация, 121
 звезда сверхновая, 81
 звёздное население I, 81
 звёзды карбоновые (углеродные),
 81
 звёзды технециевые, 81
 земная кора, 59
 изобары, 28
 изотоны, 28
 изотопический спин, 17
 изотопная планетология, 82
 изотопное фракционирование, 106
 изотопы, 14, 28
 интервал, 118
 интервальная арифметика
 Каухера, 118, 121
 интервальная арифметика
 классическая, 118, 121
 капельная модель ядер, 22
 карбонатно-силикатный
 геохимический цикл, 84
 карбонатный метаморфизм, 84
 кварки, 16
 кларк, 103
 кора планеты, 59
 коэволюция природных явлений
 на Земле, 92
 литосфера, 59
 магические числа нейтронов и
 протонов, 24
 мантия планеты, 59
 мезоны, 17
 метеорит, 87
 метеорит Альенде, 88
 модальный интервальный анализ,
 122
 модели атомных ядер, 22
 модель оболочек атомных ядер,
 25
 моды распада атомных ядер, 32
 моды распада изотопа
 висмута-212, 21, 113
 моды распада изотопов лития, 21
 монацит, 114
 моноизотопные элементы, 28
 мультиинтервал, 123
 настуран, 106
 неправильный интервал, 121
 нормальный материал, 102
 нуклеогенные изотопы, 106
 нуклеосинтез, 40
 нуклон, 16
 обилие, распространённость
 изотопов, 39
 обобщённая модель ядра, 28
 оболочечная модель ядра, 24
 оболочки планеты, 58
 параметр δ для изотопов, 138
 планеты земной группы, 59
 позитронный распад, 32
 правило Щукарева—Маттауха,
 32, 65
 правильный интервал, 121
 принцип Паули, 26
 промежуточные процессы,
 i-(intermediate) process,
 50
 прометий, 65, 67
 промилле, ‰, 139
 процесс β -распада, 41
 процесс быстрого нейтронного
 захвата (r -процесс), 48
 процесс медленного нейтронного
 захвата (s -процесс), 44
 процесс образования ядра

дейтерия, 40
 процесс радиационного захвата
 нейтронов, 41, 44
 процесс фоторасщепления ядра
 дейтерия, 40

 радиогенные изотопы, 106
 радиус интервала, 119
 редкоземельные элементы, 61
 ряд актиния или урана-актиния,
 112
 ряд радия или урана-радия, 112
 ряд тория, 21
 ряд тория, ряд 4n, 109
 середина интервала, 119
 сечения захвата тепловых
 нейтронов, 45
 сильные взаимодействия, 16, 36
 скорость Ферми, 85
 слабые взаимодействия, 33, 38
 стабильные изотопы, 95
 стандартная космологическая
 модель, 39

таблица Менделеева, 100
 таблица элементов и изотопов,
 100
 твин, 122
 тепловая энергия нейтронов, 44
 термоядерные реакции, 40
 технеций, 65
 фермионы, 17
 фоторасщепление ядер, 40
 химический элемент, 16
 хондриты, 87
 ширина интервала, 119
 эволюция минералов, 93
 электронный (бета-минус)
 распад, 32
 электронный захват, 33, 104
 ядерная физика, 16
 ядра магические, 19, 26
 ядра нечётно-нечётные, 19
 ядра чётно-нечётные, 19
 ядра чётно-чётные, 19
 ядро атомное, 16
 ядро планеты, 59