



УДК 544.11

**Н. С. Ступень**

канд. техн. наук, доц., доц. каф. химии

Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина

e-mail: chemskorp@yandex.ru

## РАЗВИТИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Рассмотрены основные этапы и перспективы развития периодической таблицы химических элементов и синтеза новых элементов.*

По-видимости, периодическому закону  
будущее не грозит разрушением, а только  
надстройки и развитие обещает...

*Д. И. Менделеев*

150 лет назад, в 1869 г., Д. И. Менделеев составил первый вариант своей таблицы химических элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве, и назвал ее «Опыт системы элементов». 2019 г. Генеральной ассамблеей ООН провозглашен Международным годом Периодической таблицы химических элементов. Это масштабное событие посвящено 150-летию открытия Периодического закона химических элементов великим русским ученым Д. И. Менделеевым.

С инициативой о проведении Международного года Периодической таблицы химических элементов выступили Российская академия наук, Российское химическое общество имени Д. И. Менделеева, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, российские и зарубежные ученые. Инициативу России поддержали зарубежные страны, международные научные организации, а также более 80 национальных академий наук и научных обществ. Среди них Международный Союз по теоретической и прикладной химии (IUPAC), Международный союз теоретической и прикладной физики (IUPAP), Европейская Ассоциация химических и молекулярных наук (EuChemS) и др.

Открытие Периодического закона и создание таблицы элементов – это действительно колоссальное научное достижение, заложившее основу современной химии и ядерной физики, позволившее четко систематизировать представления о природе и взаимодействии веществ. Первым исследователем, положившим в основу классификации научную идею о связи химических свойств элементов с их атомной массой, был немецкий ученый Иоганн Вольфганг Дёберейнер. В 1817 г. И. Дёберейнер обнаружил, что некоторые элементы, обладавшие общностью химических свойств, можно расположить по возрастанию их атомных масс так, что атомная масса среднего из трех элементов окажется равной примерно среднему арифметическому из суммы атомных масс соседних элементов (правило триад). Он назвал такие семейства элементов триадами. И. Дёберейнер составил из известных в то время элементов четыре триады: литий (Li) – натрий (Na) – калий (K); кальций (Ca) – стронций (Sr) – барий (Ba); сера (S) – селен (Se) – теллур (Te); хлор (Cl) – бром (Br) – иод (I) [1].

В 1843 г. Леопольд Гмелин опубликовал таблицу химических элементов, составленных по группам в порядке возрастания «соединительных масс». Вверху таблицы Л. Гмелин поместил три «базисных» элемента: кислород, азот и водород. Под этими



элементами ученый расположил триады, тетрады и пентады химических элементов (рисунок 1).

O		N		H
F Cl Br J				L Na K
S Se Te				Mg Ca Sr Ba
P As Sb				G Y Ce La
C B Si				Zr Th Al
Ti Ta W				Sn Cd Zn
Mo V Cr	U	Mn Co Ni Fe		
Bi Pb Ag Hg Cu				
Os Ir R Pt Pd Au				

Рисунок 1. – Таблица химических элементов Л. Гмелина (1843)

В 1850 г. немецкий ученый Макс фон Петтенкофер предложил найти у элементов соотношения, подобные тем, что обнаруживаются в гомологических рядах, т. е. в рядах соединений, отличающихся друг от друга на гомологическую разницу  $\text{CH}_2$ . Он указал, что атомные веса некоторых элементов отличаются друг от друга на величину, кратную восьми. На этом основании М. Петтенкофер высказал предположение, что элементы являются сложными образованиями каких-либо субэлементарных частиц. Такого же мнения придерживался французский химик Ж. Дюма [2].

1859 г. немецкий ученый А. Штреккер опубликовал работу «Теория и практика определения атомных весов», в которой детально разработал дифференциальную систему химических элементов, описывающую закономерности в изменении их атомных масс. Отмеченные А. Штреккером закономерности в изменении атомных масс стали важной предпосылкой для создания периодической системы химических элементов (рисунок 2).

	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.	Diff.
O = 8	Mg = 12	N = 14	F = 19	Cr = 26	
	8	8	17	16,5	22
S = 16	Ca = 20	P = 31	Cl = 35,5	Mo = 48	
	23,5	23,8	2x22	2x22	22
Se = 39,5	Sr = 43,8	As = 76	Br = 80	V = 70	
	24,5	24,8	2x22,5	2x23,5	22
Te = 64	Ba = 68,6	Sb = 120	I = 127	W = 92	

Рисунок 2. – Таблица элементов А. Штреккера (1859 г.)

Новую попытку расположить химические элементы в определенной последовательности изложил в 1862 г. французский ученый Александр Эмиль Бегуйе де Шанкуртуа. Он связал свойства элементов с функцией чисел и расположил все вокруг цилиндра по спирали. Соответственно, его таблица получила название «Земная спираль». А. Шанкуртуа нанес на боковую поверхность цилиндра, размеченную на 16 частей, линию под углом  $45^\circ$ , на которой поместил точки, соответствующие атомным массам элементов. Таким образом, элементы, атомные веса которых отличались на 16,



или на число, кратное 16, располагались на одной вертикальной линии. При этом точки, отвечающие сходным по свойствам элементам, часто оказываются на одной вертикальной линии. Так, на одну вертикаль попадали литий, натрий, калий; бериллий, магний, кальций; кислород, сера, селен, теллур и т. д. [1]. Однако А. Шанкуртуа не смог теоретически объяснить построение своей системы. Это явилось основной причиной того, что его работа осталась практически незамеченной. Недостатком спирали французского ученого было то, что на одной линии с близкими по своей химической природе элементами оказывались также и элементы с совсем иными свойствами. В группу щелочных металлов попадал марганец, а в группу кислорода и серы – ничего общего с ними не имеющий титан (рисунок 3).

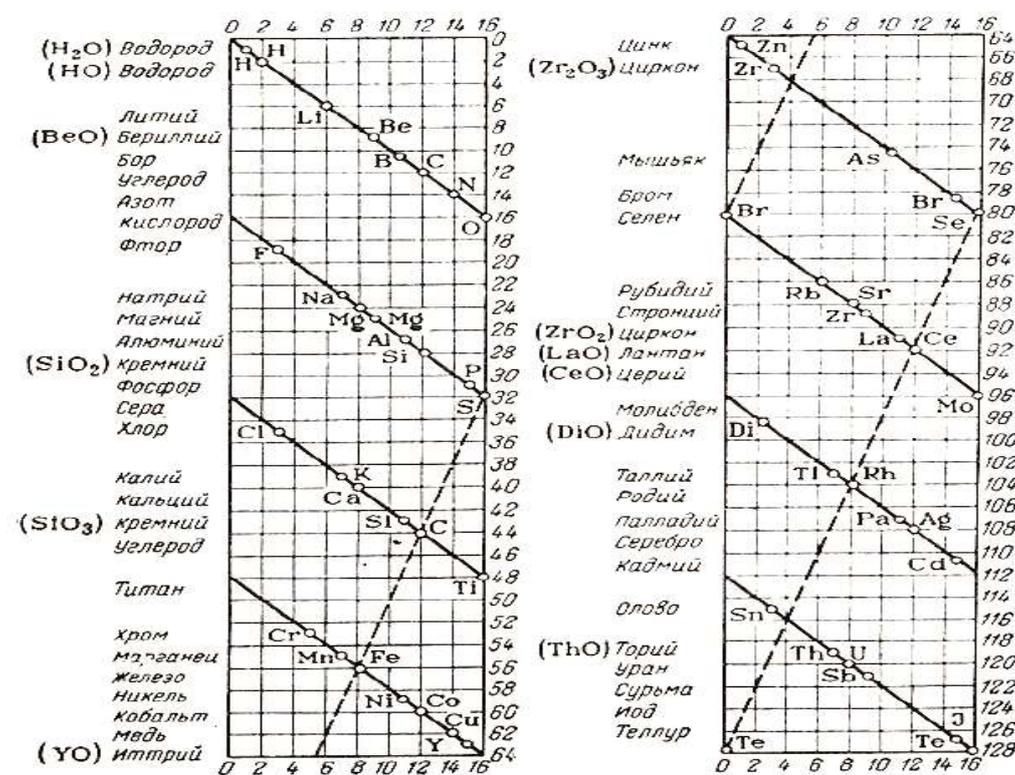


Рисунок 3. – Спиральная модель таблицы А. Шанкуртуа (1862 г.)

А. Шанкуртуа был одним из первых ученых, отметивших периодичность свойств элементов; его винтовой график действительно фиксирует закономерные отношения между атомными массами элементов [1]. Но установив некоторые соотношения между атомными массами элементов и их физико-химическими свойствами, А. Шанкуртуа не смог на основе своей «винтовой линии» подняться до закономерного обобщения – открытия Периодического закона. Руководствуясь «винтовой линией», оказалось невозможным рассчитать атомные массы неизвестных к тому времени элементов, существование которых уже можно было предположить [2; 3].

В 1864 г. Джон Ньюлендс опубликовал таблицу химических элементов, отражающую так называемый «закон октав». Ученый считал, что в ряду элементов, расположенных в порядке возрастания их атомных весов, свойства восьмого элемента сходны со свойствами первого. Например, такой октавой был ряд элементов: Н (до), Li (ре), Be (ми), В (фа), С (соль), N (ля), О (си) [3]. Действительно, такая зависимость верна,



но только для легких элементов. В таблице Дж. Ньюлендса сходные элементы располагались в горизонтальных рядах, однако в одном и том же ряду часто оказывались и элементы совершенно непохожие. Кроме этого, в некоторых клетках ученый разместил по два элемента, также не оставил пустых клеток для неоткрытых еще элементов (рисунок 4).

	№		№		№		№		№		№		№		№
H	1	F	8	Cl	15	Co Ni	22	Br	29	Pd	36	I	43	Pt Ir	50
Li	2	Na	9	K	16	Cu	23	Rb	30	Ag	37	Cs	44	Tl	51
Be	3	Mg	10	Ca	17	Zn	24	Sr	31	Cd	38	Ba V	45	Pb	52
B	4	Al	11	Cr	18	Y	25	Ce La	32	U	39	Ta	46	Tl	53
C	5	Si	12	Ti	19	In	26	Zr	33	Sn	40	W	47	Hg	54
N	6	P	13	Mn	20	As	27	Di Mo	34	Sb	41	Nb	48	Bi	55
O	7	S	14	Fe	21	Se	28	Rh Ru	35	Te	42	Au	49	Th	56

Рисунок 4. – Таблица химических элементов Дж. Ньюленса (1864)

Практически одновременно с работами Дж. Ньюлендса были опубликованы таблицы Уильма Одлинга. Еще в 1857 г. У. Одлинг составил таблицу, в которой 49 элементов были размещены в девяти группах. Спустя четыре года эта классификация была несколько усовершенствована ее автором. Все элементы, сходные по своим физико-химическим свойствам, У. Одлинг объединил в триады, тетрады и пентады. За пределами этих объединений остались водород, бор и олово [3]. В 1868 г. У. Одлинг опубликовал таблицу элементов, которая, на первый взгляд, демонстрировала закономерную взаимосвязь между всеми химическими элементами. Однако детальный анализ представленных данных позволял обнаружить явные несообразности, обесценивавшие значение таблицы: во-первых, в таблице фигурировали всего 45 элементов из 62 известных к тому времени, а во-вторых, в данных У. Одлинга присутствовали необоснованные изъятия. Например, имелись обозначения: «Mn и прочие». В этом случае под «прочими» английский ученый подразумевал железо, кобальт, никель и медь (рисунок 5).

Триплетные группы				
H 1			Mo 96	W 184
				Au 196.5
			Pd 106.5	Pt 197
Li 7	Na 23	-	Ag 108	
G 9	Mg 24	Zn 65	Cd 112	Hg 200
B 11	Al 27.5	-	-	Tl 203
C 12	Si 28	-	Sn 118	Pb 207
N 14	P 31	As 75	Sb 122	Bi 210
O 16	S 32	Se 79.5	Te 129	
F 19	Cl 35	Br 80	I 127	
	K 39	Rb 85	Cs 133	
	Ca 40	Sr 87.5	Ba 137	
	Ti 40	Zr 89.5	-	Th 231
	Cr 52.5		V 138	
	Mn 55 и др. (Fe, Ni, Co, Cu)			

Рисунок 5. – Таблица химических элементов У. Одлинга (1868)



Среди других исследователей, занимавшихся в 60-х гг. XIX в. сопоставлением атомных масс химических элементов с учетом их физико-химических свойств, весьма важное место занимал немецкий ученый Юлиус Лотар Мейер. В 1864 г. он опубликовал книгу «Современные теории химии и их значение для химической статики», впоследствии переведенную на русский язык. В этой книге содержалась таблица, в которой 44 химических элемента (из 63 известных к тому времени) были размещены в 6 столбцах в соответствии с их высшей валентностью (рисунок 6).

	4 werthig	3 werthig	2 werthig	1 werthig	1 werthig	2 werthig
	---	---	---	---	Li = 7.03	(Be = 9.3?)
Differenz =	---	---	---	---	16.02	(14.7)
	C = 12.0	N = 14.04	O = 16.00	Fl = 19.0	Na = 23.05	Mg = 24.0
Differenz =	16.5	16.96	16.07	16.46	16.08	16.0
	Si = 28.5	P = 31.0	S = 32.07	Cl = 35.46	K = 39.13	Ca = 40.0
Differenz =	$\frac{89.1}{2} = 44.55$	44.0	46.7	44.51	46.3	47.6
	---	As = 75.0	Se = 78.8	Br = 79.97	Rb = 85.4	Sr = 87.6
Differenz =	$\frac{89.1}{2} = 44.55$	45.6	49.5	46.8	47.6	49.5
	Sn = 117.6	Sb = 120.6	Te = 128.3	I = 126.8	Cs = 133.0	Ba = 137.1
Differenz =	89.4 = 2 x 44.7	87.4 = 2 x 43.7	---	---	(71 = 2 x 35.5)	---
	Pb = 207.0	Bi = 208.0	---	---	(Tl = 204?)	---

Рисунок 6. – Таблица Ю. Мейера (1864 г., фрагмент)

Следующую таблицу Ю. Мейер предложил в вышедшей в 1870 г. статье, которая содержала также график зависимости атомного объема элемента от атомного веса, имеющий характерный пилообразный вид. Таблица «Природа элементов как функция их атомного веса» состояла из девяти вертикальных столбцов, сходные элементы располагались в горизонтальных рядах; некоторые ячейки таблицы Ю. Мейер оставил незаполненными (рисунок 7).

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
	B = 11.0 C = 11.97	Al = 27.3 Si = 28	---	---	---	<sup>71</sup> In = 113.4 Sn = 117.8	---	Tl = 202.7 Pb = 206.4
	N = 14.01	P = 30.9	Ti = 48	As = 74.9	Zr = 89.7	Sb = 112.2	---	Bi = 207.5
	O = 15.96	S = 31.98	V = 51.2	Se = 78	Nb = 93.7	Te = 128 <sup>?</sup>	Ta = 182.2	---
	F = 19.1	Cl = 35.38	Cr = 52.4	Br = 79.75	Mo = 95.6	J = 126.5	W = 183.5	---
			Mn = 54.8 Fe = 55.9 Co = Ni = 58.6		Ru = 103.5 Rh = 104.1 Pd = 106.2		Os = 198.6 <sup>?</sup> Ir = 196.7 Pt = 196.7	
Li = 7.01	Na = 22.99	K = 39.04		Rb = 85.2		Cs = 132.7		---
?Be = 9.3	Mg = 23.9	Ca = 39.9	Cu = 63.3	Sr = 87.0	Ag = 107.7	Ba = 136.8	Au = 196.2	---
			Zn = 64.9		Cd = 111.6		Hg = 199.8	---

Differenz von I zu II und von II zu III ungefähr = 16  
Differenz von III zu V, IV zu VI, V zu VII schwankend um 46  
Differenz von VI zu VIII, von VII zu IX bis 92

Рисунок 7. – Таблица Л. Мейера (1870 г., фрагмент)



В отличие от своих научных предшественников Д. И. Менделеев за основу взял не одну только атомную массу элементов, но и результаты применения «метода атомной аналогии» (рисунок 8).

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ									
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ									
				Ti = 50	Zr = 90	? = 180.			
				V = 51	Nb = 94	Ta = 182			
				Cr = 52	Mo = 96	W = 186.			
				Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.			
				Fe = 56	Rn = 104,4	Ir = 198.			
				Ni = 59	PL = 106,6	Os = 199.			
				Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200			
H = 1				Zn = 65,2	Cd = 112				
	Be = 9,4	Mg = 24		? = 68	Ur = 116	Au = 197?			
	B = 11	Al = 27,4		? = 70	Sn = 118				
	C = 12	Si = 28							
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?				
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?					
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127					
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204				
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207				
		? = 45	Ce = 92						
		?Er = 56	La = 94						
		?Yt = 60	Di = 95						
		?In = 75,6	Th = 118?						

Д. Менделеевъ.

Рисунок 8. – Первый вариант  
Таблицы Д. И. Менделеева (1869 г.)

Д. И. Менделеев предсказывал свойства еще не открытых элементов, оставляя пустые ячейки в Периодической таблице, прогнозируя открытия соответствующих элементов. В историческом аспекте его прогнозы довольно быстро полностью подтвердилось. И эти исторические события ярко и отчетливо демонстрируют гениальность Д. И. Менделеева. Периодический закон позволил Д. И. Менделееву, оперировавшему 63 известными тогда элементами, шаг за шагом исправить атомные веса 11 из них. Далее, уже в 1875 г., французский химик П. Лекок де Буабодран открыл галлий, который оказался предсказанным Д. И. Менделеевым «экаалюминием». В 1879 г. Л. Нильсон открыл новый элемент – скандий, который оказался предсказанным Дмитрием Ивановичем «экабором». В 1885 г. К. Винклер открыл новый элемент германий, который оказался предсказанным «экасилицием». Из 29 предсказанных элементов Менделеев с удивительной точностью описал 12. При этом подробности свойств относились не только к простым веществам, но и к их соединениям. Открытие новых химических элементов позволило в свое время Д. И. Менделееву защитить право на открытие Периодического закона, поскольку этими открытиями подтвердились его предсказания [4].

В начале XX в. Периодическая система элементов неоднократно видоизменялась для приведения в соответствие с новейшими научными данными. В 1900 г. Дмитрий Менделеев и Уильям Рамзай, открывший инертные газы, пришли к выводу о необходимости включения в периодическую систему элементов особой, нулевой группы. В 1906 г. Д. И. Менделеев составил новый, подлинный вариант Периодической системы с учетом



поправок и внес не только нулевую группу инертных элементов, но и предсказанный им элемент эфира ньютоний и элемент короний как аналог аргону, но не имеющий массы. Детальная разработка «химической концепции мирового эфира» началась с открытия инертных газов (рисунок 9) [4].

Периодическая система элементов по группам и рядам.

Ряды	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ											
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1		Водо- родъ. H 1,008										
2	Гелий. He 4,0	Литий. Li 7,03	Берил- лий. Be 9,1	Боръ. B 11,0	Угле- родъ. C 12,0	Азотъ. N 14,01	Кисло- родъ. O 16,00	Фторъ. F 19,0				
3	Неонъ. Ne 19,9	Натрий. Na 23,06	Маг- ний. Mg 24,36	Алю- миний. Al 27,1	Крем- ний. Si 28,2	Фос- форъ. P 31,0	Сѣра. S 32,06	Хлоръ. Cl 35,45				
4	Аргонъ. Ar 38	Калий. K 39,15	Каль- ций. Ca 40,1	Скан- дий. Sc 44,1	Титанъ. Ti 48,1	Вана- дий. V 51,2	Хромъ. Cr 52,1	Мар- ганецъ. Mn 55,0	Же- лезно. Fe 55,9	Кобальтъ. Co 59	Никель. Ni 59	(Cu)
5		Медь. Cu 63,6	Цинкъ. Zn 65,4	Гал- лий. Ga 70,0	Гер- маний. Ge 72,5	Мышь- ьякъ. As 75	Сѣ- ленъ. Se 79,2	Бромъ. Br 79,96				
6	Бромъ. Kr 81,8	Рубидий. Rb 85,5	Строн- ций. Sr 87,6	Ит- рий. Y 89,0	Цир- коній. Zr 90,6	Нιο- бій. Nb 94,0	Молиб- денъ. Mo 96,0		Рутеній. Ru 101,7	Родий. Rh 103,0	Палладій. Pd 106,5	(Ag)
7		Серебро. Ag 107,93	Кад- мій. Cd 112,4	Индій. In 115,0	Олово. Sn 119,0	Стру- жъ. Sb 120,2	Тел- луръ. Te 127	Йодъ. J 127				
8	Ксенонъ. Xe 128	Цезій. Cs 132,9	Барій. Ba 137,4	Лан- танъ. La 138,9	Церий. Ce 140,2							
9												
10				Иттер- бій. Yb 173		Тан- талъ. Ta 183	Вольф- рамъ. W 184		Ос- мій. Os 191	Ири- дий. Ir 193	Платина. Pt 194,8	(Au)
11		Золото. Au 197,2	Ртуть. Hg 200,6	Талий. Tl 204,1	Свин- цовъ. Pb 206,9	Вис- мутъ. Bi 208,5						
12			Радий. Rd 225		Торий. Th 232,5		Уранъ. U 238,5					

Высшіе солеобразные окислы:  
R R<sup>0</sup> RO R<sup>2</sup>O<sup>3</sup> RO<sup>3</sup> R<sup>2</sup>O<sup>5</sup> RO<sup>3</sup> R<sup>2</sup>O<sup>7</sup> RO<sup>4</sup>

Высшія газообразныя водородныя соединенія:  
RH<sup>4</sup> RH<sup>3</sup> RH<sup>2</sup> RH

Рисунок 9. – Периодическая таблица  
Д. И. Менделеева (1906)

Благодаря открытию сложного строения атома, радиоактивности, развитию квантовой механики Периодический закон получил квантово-механическое обоснование и начался синтез искусственных элементов. Таблица элементов, найденных в природе, кончается 92-м элементом ураном (U). Открытый в 1940 г. нептуний (Np, Z = 93) был первым искусственно полученным трансурановым элементом.

В 30-х гг. XX в. велись интенсивные исследования искусственных радиоактивных веществ, в частности продуктов бомбардировки нейтронами урана. Химический анализ этих продуктов приводил к выводу о существовании элементов тяжелее урана. В 1939 г. Мак-Миллан в продуктах облучения урана нейтронами открыл радиоактивный изотоп с периодом полураспада 2,3 суток. Затем изотоп исследовали итальянские ученые Э. Сегрэ и К. Перрье, которые установили, что его свойства подобны свойствам редкоземельных элементов. В мае 1940 г. Мак-Миллан и Абельсон изучили реакцию образо-



вания изотопа: уран-238 путем захвата нейтрона превращается в уран-239 (период полураспада 23 мин.), который в свою очередь превращается в нептуний-239. Название «нептуний» дано новому элементу потому, что он следует за ураном в соответствии с расположением планет в Солнечной системе [5]. В 1942 г. был открыт другой изотоп – нептуний-237 (Глен Теодор Сиборг), распадающийся с  $\alpha$ -излучением (период полураспада 2,25 млн лет. Плутоний (Pu, № 94) – первый искусственный элемент, полученный в доступных для взвешивания количествах (1942 г.). В дальнейшем под руководством Сиборга были синтезированы америций (№ 95) (1944–1945), кюрий (№ 96) (1944), берклий (№ 97) (1949), калифорний (№ 98) (1950), эйнштейний (№ 99) (1952), фермий (№ 100) (1953), менделевий (№ 101) (1955), nobelium (№ 102) (1958) и лоуренсий (№ 103) (1961). Следует упомянуть, что, по утверждению советского академика Г. Н. Флерова, элементы с  $Z = 102$  и  $103$  были достоверно идентифицированы в Дубне в 1963–1966 гг.

Элемент № 101 получил название «менделевий» в честь великого русского ученого. Синтез менделевия, который получили в начале экспериментов лишь в количестве нескольких атомов (11), подтвердил заключение ученых о том, что возможности использования для бомбардировки мишеней легких частиц (альфа-частиц, дейтронов) исчерпаны. И в 1950-е гг. физики перешли к новым методам синтеза – к реакциям слияния с участием тяжелых ионов ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  и др.) [6].

Для целей осуществления ядерных реакций на ускоренных тяжелых ионах разработаны специальные ускорители тяжелых ионов, в том числе в 1960 г. создан циклотрон У-300 в Дубне. Получение элементов с  $Z \geq 102$  являлось очень сложной экспериментальной задачей. Образование ядер этих элементов, происходит в конкуренции с делением составного ядра, в которое вносится большая энергия возбуждения (40–50 МэВ). Поэтому эти реакции были названы «реакциями горячего синтеза». Например, при синтезе 102-го элемента в реакции  $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{256}\text{No}$  отношение вероятности деления к вероятности получить искомое ядро  $^{256}\text{No}$  равно  $\sim 108$ . Это означает, что за несколько часов эксперимента можно получить только полтора-два десятка атомов nobelium [7].

Возврат к реакциям горячего синтеза с использованием в качестве бомбардирующих частиц иона  $^{48}\text{Ca}$  привел российских ученых к ряду впечатляющих открытий в области сверхтяжелых элементов. В качестве мишенного материала применяли изотопы актинидов (U, Np, Pu, Am, Cm, Cf). Проведенные эксперименты привели к синтезу шести сверхтяжелых химических элементов в области  $Z = 113–118$ , которые завершили седьмой период Периодической системы Д. И. Менделеева. В исследованиях, отмечено авторами этих открытий, впервые были получены и определены свойства распада ядер свыше 50 новых изотопов элементов 104–118, обладающих большим избытком нейтронов. Они существенно пополнили карту нуклидов и расширили ее до  $Z = 118$  [8; 9].

Проблема верхней границы Периодической таблицы возникла практически сразу же после установления Периодического закона и до сих пор остается одной из самых актуальных в современном естествознании.

В рамках квантовой электродинамики таблицу Менделеева можно рассчитать в детальных подробностях, что делалось неоднократно в так называемом нерелятивистском приближении, вплоть до элемента с атомным номером 172. Сколько может быть элементов в Периодической таблице и как определяются ее границы, нужно рассматривать с двух позиций – ядерной физики и атомной физики. В первом случае атом (элемент) есть, пока существует ядро с периодом полураспада не менее  $10^{-14}$  с (время, необходимое для того, чтобы вокруг ядра образовалась соответствующая электронная структура атома). Во втором – атом (элемент) существует до тех пор, пока никакие дополнительные (ранее не учтенные) эффекты не изменят предсказаний квантовой электродинамики.



С увеличением атомного номера элемента растет электрическое поле ядра, в котором двигаются электроны. По мере приближения их скорости к скорости света, согласно теории относительности, растет релятивистская масса электрона. Это в первую очередь относится к электронам на внутренних орбитах, ближайших к ядру, движущихся с максимальной скоростью. Релятивистский эффект приводит к сжатию внутренних орбит (релятивистское сжатие). Эффект должен быть учтен в расчете структуры сверхтяжелого атома, что не было сделано в упомянутых выше нерелятивистских расчетах [10; 11].

Не менее важны и последствия сжатия внутренних орбит, такие как экранирование поля ядра, электронные корреляции на внешних орбитах, а также другие поправки более высокого порядка. Первые наблюдения релятивистского эффекта в 12-й группе таблицы Менделеева были проведены в Дубне в 2007 г. с 3,6-секундным изотопом 112-го элемента коперниция (Cn) и его легким гомологом – ртутью (Hg). Последующие измерения для элементов 14-й группы флеровия (Fl) и свинца (Pb) показали сильный рост этого эффекта [12; 13].

Теоретические предсказания того, какую часть таблицы Менделеева еще предстоит заполнить, довольно сильно разнятся. Физик Ричард Фейнман предсказывал, что последним элементом Периодической системы станет элемент № 137. Это предсказание опирается на эйнштейновскую модель относительности: по мере увеличения заряда ядра электроны начинают двигаться все быстрее и быстрее, и в какой-то момент скорость электронов, при которой они не упадут на ядра, должна превысить скорость света, что физически невозможно. Другие расчеты говорят о том, что предел Периодической системы расположен гораздо дальше – в районе ядра, содержащего около 170 протонов [14].

Эксперименты по «горячему» слиянию атомных ядер позволили получить более богатые нейтронами изотопы трансактиноидов, и их устойчивость оказалась на порядки выше. Новый толчок в развитии представлений о строении атомного ядра привел к предсказанию так называемого «острова стабильности» для насыщенных нейтронами атомных ядер в области  $Z = 114$ ; дальнейшие эксперименты и уточнения ядерной модели отодвинули «центр» этого острова в область  $Z = 120$ . На практике с помощью реакций «горячего» слияния ядер удалось достичь лишь «берега» этого острова, однако для получения наиболее стабильных ядер в этой области необходимо слишком большое количество нейтронов.

Уточненные модели атомного ядра предсказывают также наличие второго «острова стабильности» в области  $Z = 164$ . И если пока не найдены способы получить такие ядра искусственно, не следует исключать возможность их образования в космосе в ходе так называемого г-процесса (от англ. rapid – ‘быстрый’), т. е. процесса быстрой «накачки» атомных ядер нейтронами. Например, при взрывах сверхновых звезд плотность нейтронного потока превышает 1022 нейтрона в секунду на квадратный сантиметр, в результате чего за короткое время из ядер железа в большом количестве синтезируются сверхтяжелые ядра. Если будут надежно предсказаны спектры пока еще не полученных сверхтяжелых элементов, а астрономам удастся добиться хорошего отношения сигнал/шум, то, возможно, первые атомы этих элементов будут обнаружены именно в космосе, а не в земных условиях. В любом случае, есть вероятность того, что рассуждения о химии элементов в области  $Z = 164$  окажутся вероятными [13; 14].

Попытка синтеза элемента 119 предпринималась в 1985 г. при помощи бомбардировки мишени из эйнштейния-254 ядрами кальция-48 на ускорителе Super NICA в Беркли. К сожалению, не удалось идентифицировать ни одного атома. Наряду с российскими физиками из ОИЯИ опыты по синтезу элемента 119 сейчас готовятся в Центре по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца (Германия) и Институте



физико-химических исследований (RIKEN, Япония). Так, для получения 119-го элемента японские ученые собираются соединить ядра 23-го элемента ванадия и 96-го элемента кюрия, а для получения 120-го элемента – ядра того же кюрия и 24-го элемента – хрома.

Исследователи надеются, что дважды магические изотопы унбинилия и унбигексия (элемента № 126), содержащие и магическое количество протонов, и магическое количество нейтронов, должны жить гораздо дольше, чем другие изотопы этих элементов. Правда, оценка времени жизни этих ядер достаточно сильно различается, и может исчисляться как десятками минут, так и миллионами лет.

В подтверждение гипотезы «острова стабильности» исследователи уже приводят информацию об устойчивости известных изотопов сверхтяжелых элементов, содержание нейтронов в которых приближается к магическому числу 184. Анализ опубликованных результатов показывает, что в области  $120 < Z < 155$  однозначно определить структуру электронного облака пока что невозможно, и лишь некоторые общие тенденции могут быть предсказаны с достаточной уверенностью. Однако для  $Z > 155$  обнаруживается весьма интересное стечение обстоятельств: сближаются по энергии 7d- и 9s-подуровни, а затем 8p и 9p, после которых образуется большой энергетический зазор.

Таким образом, если исходить из аналогий в химических свойствах, в главном ряду восьмого периода следует поместить элементы 119, 120 и 157–172 как аналоги элементов пятого периода. Элементы же 121–156 можно назвать «ультрапереходными» и вынести в дополнительную вставку из двух рядов по 18 элементов, изящно совпадающих по длине с основной таблицей, и расположенных аналогично семействам лантаноидов и актиноидов. Такое расположение обосновано еще и тем, что эволюция предсказанных свойств ультрапереходных элементов напоминает картину, сложившуюся в семействах f-элементов [13].

В настоящее время остается под вопросом, является ли 118-й элемент благородным газом. Он может продемонстрировать принадлежность к 18-й группе, хотя, возможно, и не будет газом при комнатной температуре. Вероятно также, что у 119-го элемента обнаружится скачок химических свойств – от характерных для 18-й группы Периодической таблицы до известных у элементов 1-й группы. Но определенно релятивистский эффект заметно ослабит эти изменения. Есть основания полагать, что при дальнейшем увеличении атомного номера уже для элементов 121–123 групповые отличия почти исчезнут. По сути, исчезнет периодичность в изменении химических свойств элементов. На смену старой Периодической таблице придет новая, сильно измененная в начале восьмого периода [13; 14].

Периодическая система химических элементов претерпела много изменений за 150 лет существования. С 1869 г. и по настоящее время было создано огромное количество вариантов таблиц химических элементов, многие из которых отражают те или иные фундаментальные закономерности их строения и взаимосвязи, в том числе и ранее не известные. Из современных вариантов систем химических элементов особый интерес, на наш взгляд, представляют сотовая система элементов, предложенная Б. Н. Гердевым, естественная матрица фундаментальных законов строения физико-химических элементов, их оболочек, ядер и атомов в целом Ю. А. Галушкина, а также таблица А. В. Градобоева и В. С. Матвеева, которые установили закономерности строения элементов и попытались определить конечность Периодической системы.

Естественная сотовая система химических элементов, экзотическая форма графического выражения Периодического закона, представляет собой последовательную (естественную) запись химических элементов в порядке возрастания атомного номера, без «разрывов», характерных для Периодической системы. Последовательная запись



элементов в порядке возрастания осуществляется здесь в особой сотовой структуре, состоящей из треугольных ячеек. Здесь, начиная с водорода, элементы заполняют ячейки сотовой системы друг за другом в порядке возрастания атомного номера по спирали от центра к периферии таблицы (рисунок 10).

Рисунок 10. – Сотовая система  
химических элементов Б. Н. Гердева

Сотовая система химических элементов представляет собой множество уложенных в куб элементарных равносторонних треугольников (сот), занятых тем или иным элементом. Интересно, что при размере стороны элементарного треугольника 1,1 мм 150 химических элементов умещаются в куб размером 55 мм. У этого куба есть две особенности: первая – совокупность элементов представляет собой спираль, уложенную в куб; вторая – элементы занимают только три из шести граней куба [15].

Таблица Ю. А. Галушкина, особенно ее реконструкция в виде 3D-модели, позволяет обнаружить, что в основе «законов строения Ядра и Атома в целом лежат Законы Простых (неделимые) природообразующих Prima (P) чисел». При этом строение матрицы соответствует строению природных и искусственных кристаллов и даже монокристаллов.

3D-спирально пространственная расходящаяся система каркаса матрицы химических элементов имеет 4 блока периодичности:

- первый блок А химических элементов образуют всего два химических элемента: водород  $H^1$  и гелий  $He^2$ ;
- второй блок В составляют химические элементы от лития  $Li^3$  до аргона  $Ar^{18}$ ;
- третий блок С состоит из элементов от калия  $K^{19}$  до ксенона  $Xe^{54}$ ;
- четвертый блок химических элементов D имеет элементы от цезия  $Cs^{55}$  до оганесона  $Og^{118}$  [16].

Третья таблица, А. В. Градобоева и В. С. Матвеева, увязывает число элементов с числом изотопов и элементарных частиц. При этом существование предельного числа химических элементов предопределяет конечность числа элементарных частиц [17].



Кроме того, следует отметить работы Д. Х. Базиева по созданию завершенной системы элементов Периодической системы Д. И. Менделеева, а также исследования А. М. Дроздова, Н. С. Имянитова и др.

Предсказанные «островки стабильности» наводят на мысль о новой загадке Периодического закона: его строгость заметно коррелирует с устойчивостью атомных ядер. «Периодическая система Менделеева и по сей день служит основой для наиболее тонких и сложных исследований» (Глен Сиборг).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азимов, А. Краткая история химии. Развитие идей и представлений в химии / А. Азимов. – М. : Мир, 1983. – 261 с.
2. Менделеев, Д. И. Периодический закон. Основные статьи / Д. И. Менделеев ; ред. ст. и примеч. Б. М. Кедрова. – М. : Изд-во АН СССР, 1958. – 830 с.
3. Волков, В. А. Выдающиеся химики мира / В. А. Волков, Е. В. Вонский, Г. И. Кузнецова // Биографический справочник / под ред. проф. В. И. Кузнецова. – М. : Высш. шк., 1991. – 221 с.
4. Кадзи, М. Сравнительный анализ восприятия Периодической системы в разных странах в период с 1870-х по 1920-е годы / М. Кадзи // Успехи в химии и химической технологии. – 2014. – Т. 28, № 4 (153). – С. 8–11.
5. Fricke, V. Dirac-Fock-Slater calculations for the elements  $Z = 100$ , fermium, to  $Z = 173$  / V. Fricke // At. Data Nucl. Data Tables. – 1977. – № 19. – P. 83–95.
6. Петржак, К. А. Спонтанное деление урана / К. А. Петржак, Г. Н. Флеров // Журн. эксперим. и теорет. физики. – 1940. – Т. 10, вып. 9–10. – С. 1013.
7. Дубна – остров стабильности : Очерки по истории Объединенного института ядерных исследований, 1956–2006 гг. / под общ. ред. В. Г. Кадышевского, А. Н. Сисакяна. – М. : Академкнига, 2006. – 643 с.
8. Оганесян, Ю. Ц. Синтез и исследование свойств сверхтяжелых атомов. Фабрика сверхтяжелых элементов / Ю. Ц. Оганесян, С. Н. Дмитриев // Успехи химии. – 2016. – № 85 (9). – С. 901.
9. Пресс-релиз Объединенного института ядерных исследований. Открытие новых химических элементов с номерами 113, 115, 117 и 118 [Электронный ресурс] // ОИЯИ. – 6.01.2016. – Режим доступа: <http://www.jinr.ru/posts/otkrytienovyh-himicheskikh-elementov-s-nomerami-113-115-117-i>.
10. Имянитов, Н. С. Новая основа для описания периодичности / Н. С. Имянитов // Журн. общ. химии. – 2010. – Т. 80, вып. 1. – С. 69–72.
11. Сергина, М. Н. Проблема верхней границы периодической системы Д. И. Менделеева / М. Н. Сергина, А. М. Зимняков // Изв. Пенз. гос. пед. ун-та им. В. Г. Белинского. – 2006. – № 5. – С. 231–234.
12. Грайнер, В. В. Расширение Периодической системы элементов: сверхтяжелые – супернейтронные / В. В. Грайнер // Успехи химии. – 2009. – № 78 (12). – С. 1177–1199.
13. Оганесян, Ю. Ц. Синтез и изучение свойств новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева / Ю. Ц. Оганесян // Вестн. Рос. фонда фундам. исслед. – 2019. – № 1 (101). – С. 87–94.
14. Pyykkö, P. A suggested periodic table up to  $Z \leq 172$ , based on Dirac-Fock calculations on atoms and ions / P. Pyykkö // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2011. – № 13 (1). – P. 161–168.



15. Естественная система химических элементов Б. Н. Гердева [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gerdev-sota.narod.ru>. – Дата доступа: 05.10.2019.

16. Галушкин, Ю. А. К вопросу о значении и ключевой роли открытия новых альтернативных источников энергии для устойчивого развития общества / Ю. А. Галушкин // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. – 2015. – № 1. – С. 51–54.

17. Градобоев, А. В. Закономерности строения элементов и конечность Периодической системы Д. И. Менделеева / А. В. Градобоев, В. С. Матвеев // Томск : Изд-во Том. полит. ун-та, 2008. – 183 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 15.10.2019

***Stupen N. S. Development of the Periodic System of Chemical Element***

*The article considers the main stages and prospects of development of the periodic table of chemical elements and synthesis of new elements.*