

УДК 372.854  
ББК 74.262.4

DOI: 10.31862/1819-463X-2020-3-51-58

## ОБ ИЗУЧЕНИИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗАКОНА Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА И СОВРЕМЕННОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ШКОЛЬНОМ КУРСЕ ХИМИИ

С. Ф. Жильцов, О. Н. Дружкова, С. А. Опарина

**Аннотация.** *Статья посвящена 150-летию периодического закона Д. И. Менделеева, устанавливающего зависимость изменения свойств простых и сложных веществ от величины атомной массы элементов. Рассмотрены основные аспекты изучения данной темы в школьном курсе химии на основе исторических фактов и сведений, а также ее дальнейшее развитие в свете электронной теории строения материи. Для учащихся смоделирована современная Периодическая система химических элементов на основе используемых ученым принципов и сложившихся представлений об электронной структуре атомов. Периодический закон является отражением периодичности заполнения электронами энергетических уровней известных в настоящее время 118 химических элементов.*

**Ключевые слова:** *периодический закон, периодическая система элементов, развитие, электронная структура, прогнозирование свойств.*

ON THE STUDY OF D. I. MENDELEEV PERIODICAL LAW  
AND THE MODERN PERIODICAL SYSTEM OF CHEMICAL ELEMENTS  
IN THE SCHOOL CHEMISTRY COURSE

S. F. Zhiltsov, O. N. Druzhkova, S. A. Oparina

**Abstract.** *The article is dedicated to the 150th anniversary of D. I. Mendeleev's periodical law, which establishes the dependence of changes in the properties of simple and complex substances on the atomic mass of elements. The main aspects of the study of this topic in the school course of chemistry on the basis of historical facts and information, as well as its further development in the light of electronic theory of the structure of matter are considered. Modern Periodical system of chemical elements on the basis of principles used by scientists*

© Жильцов С. Ф., Дружкова О. Н., Опарина С. А., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License  
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

*and existing ideas about electronic structure of atoms is modeled for pupils. The periodic law is a reflection of the frequency with which electrons fill the energy levels of currently known 118 chemical elements.*

**Keywords:** *periodic law, periodic system of elements, development, electronic structure, prediction of properties.*

**В** 2019 г. мировая общественность отмечала 150-летие со дня открытия гениальным русским ученым Д. И. Менделеевым Периодического закона и построенной на его основе Периодической системы химических элементов, являющейся могучим средством познания природы и ее закономерностей.

Ученый работал над Периодической системой в период своей преподавательской деятельности, и помимо задачи систематизации химических элементов, приведшей к открытию Периодического закона, перед ним стояла проблема разработки учебного курса, который в дальнейшем стал основой всемирно известного учебника «Основы химии» [1].

В дидактике химии Периодическому закону Д. И. Менделеева отводится ведущая роль, так как он является теоретической методологической основой изучения химии. Сегодня поиски методистов направлены на то, чтобы найти пути наиболее полного использования образовательных, воспитывающих, развивающих возможностей темы.

Образовательные задачи темы «Периодический закон» выражаются в формировании у учащихся понимания сущности явления периодичности, в выработке умения пользоваться Периодической системой для объяснения, сравнения и прогнозирования свойств химических элементов.

Развивающий аспект темы выражается в возможностях содержания темы для развития приемов мышления, особенно при использовании проблемного подхода; в этой теме претерпевают значительный скачок важнейшие понятия (о химическом элементе, веществе, химической реакции), следствием чего также является развитие мышления учащихся.

Воспитательные задачи темы заключаются в том, чтобы обеспечить понимание значения Периодического закона и Периодической системы для развития науки и производства, показать на примере учения о периодичности объясняющую, обобщающую и прогнозирующую роли научной теории, роль практики в процессе познания.

Традиционно выделяют следующие этапы изучения данной темы, представленные на рис. 1.



**Рис. 1.** Основные этапы изучения темы «Периодический закон и Периодическая система химических элементов»

Вследствие важного значения темы «Периодический закон и Периодическая система химических элементов» особую роль приобретает проблема его развития в свете электронной теории строения материи, включая новый подход к систематизации известных на сегодняшний день химических элементов.

Попытки классификации элементов предшественниками Д. И. Менделеева (триады И. В. Деберейнера, (1829), размещение их по спирали соответственно атомным массам Б. де Шанкуртуа (1862), «октавы» Д. А. Р. Ньюлендса (1863–1865), таблицы У. Одлинга (1857) и Л. Мейера (1869–1870)) сводились к сближению и сопоставлению между собой лишь химически сходных элементов. Между несходными элементами они не искали каких-либо внутренних связей, общих закономерностей. Для Д. И. Менделеева особенно важным было связать индивидуальные свойства химических элементов: «связать эти индивидуальности общей идеею – целью моей естественной системы» [2, с. 111]. Он был убежден, что между всеми химическими элементами должна существовать закономерная связь, объединяющая их в единое целое. Сравнив свойства всех 63 известных в то время элементов и формы образуемых ими соединений, им была выявлена определенная зависимость изменения этих свойств от значений атомных масс элементов, являющихся основой Периодического закона:

*Свойства простых тел, а также формы и свойства соединений элементов находятся в периодической зависимости от величины атомных масс элементов.*

Химические элементы – материальные составные части простых и сложных тел. Заметим, Д. И. Менделеев не отождествлял элемент с простым веществом. В «Основах химии» [1] он пишет: «Многие простые тела существуют в различных видоизменениях, а элемент есть нечто, изменению не подлежащее. Так, углерод является в виде угля, графита и алмаза, которые суть различные тела, причем простые, а элемент один. Тот же углерод содержится и в угле-

кислом газе, но в нем нет ни угля, ни графита, ни алмаза» [1, с. 249].

Иногда не совсем корректно элементы классифицируют на металлы и неметаллы. На самом деле типичные металлические свойства (ковкость, блеск, тепло- и электропроводимость, температура плавления и т. д.) проявляют не сами элементы, а простые вещества, образованные, например, атомами щелочных элементов. Наиболее противоположными им по свойствам являются простые вещества на основе атомов галогенов, относящиеся к типичным неметаллам. Если для элементов марганца и хлора взять сходные по форме и свойствам соединения  $KMnO_4$  и  $KClO_4$ , не имеет смысла говорить о металлической и неметаллической природе марганца и хлора в данных солях.

Ряд элементов, начинающийся щелочным и заканчивающийся галогеном, Д. И. Менделеев назвал периодом. Позднее после открытия в конце XIX в. благородных газов периоды стали ими заканчиваться (первоначально им была отведена нулевая группа).

Расположив периоды друг под другом так, чтобы сходные элементы находились в одном вертикальном столбце, Д. И. Менделеев получил систему химических элементов, являющуюся графическим изображением Периодического закона.

Опираясь на Периодический закон, довольно точно ученый также предсказал свойства галлия, скандия и германия, а также исправил атомные массы некоторых элементов. Им было предсказано существование 11 элементов (Ga, Ge, Sc, Tc, Re, Po, At, Fr, Ra, Ac, Pa).

Надо отметить, Д. И. Менделеев в то же время указывал, что «мы не понимаем причины Периодического закона», но был уверен, что «Периодическому закону будущее не грозит разрушением, а только надстройкой и развитие обещает» [3, с. 34].

Периодический закон закрепил успехи атомной теории и поставил проблемы, направленные на выявление строения вещества. Д. И. Менделеева не покидала мысль о сложности строения атома. Он высказывал

предположение, «что атомы простых тел суть сложные вещества, образованные сложением некоторых еще меньших частей (ультиматов), что называемое нами неделимым (атом) – неделимо только обычными силами», «выставленная мной периодическая зависимость между свойствами и весом, по-видимому, подтверждает твое предчувствие» [4, с. 805].

Действительно только теория строения атома вскрыла физический смысл Периодического закона. В 1897 г. был открыт электрон, а в 1911 г. – протон – элементарные частицы атома. Согласно современной теории строения вещества, атомы химических элементов состоят из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него электронов, образующих слоистую оболочку из энергетических уровней. Электроны одновременно проявляют корпускулярные и волновые свойства, их состояние описывается законами квантовой механики, применимыми для микромира.

В 1913 г. английский физик Генри Мозли установил, что порядковый номер элемента в Периодической системе Д. И. Менделеева совпадает с зарядами ядра его ато-

мов. С этой точки зрения *элементы представляют определенный вид вещества, все атомы которого имеют один и тот же заряд ядра*. В Периодической системе элементы расположены строго последовательно в порядке возрастания зарядов ядер их атомов от первого (водорода) до искусственно полученного с атомным номером 118. Современная формулировка Периодического закона: *Свойства элементов, а также формы и свойства их соединений находятся в периодической зависимости от зарядов ядер их атомов*.

Важнейшей характеристикой любого элемента является его валентная электронная конфигурация. По распределению валентных электронов по подуровням элементы классифицируют на *s*-, *p*-, *d*- и *f*-семейства. К *s*-элементам относятся водород, гелий, щелочные и щелочноземельные элементы с электронной конфигурацией внешнего слоя  $ns^1$  и  $ns^2$ . Элементы IIIA–VIIIA групп с электронной конфигурацией внешнего слоя от  $ns^2np^1$  до  $ns^2np^6$ , у которых валентными являются не только *s*-, но и *p*-орбитали, относятся к *p*-семейству. Все элементы побочных подгрупп В I–VIII групп

№ п/п Ряд	I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	H (1)														(H) He (2)	
2	Li (3)		Be (4)		B (5)		C (6)		N (7)		O (8)		F (9)		Ne (10)	
3	Na (11)		Mg (12)		Al (13)		Si (14)		P (15)		S (16)		Cl (17)		Ar (18)	
4	K (19)		Ca (20)		Sc (21)		Ti (22)		V (23)		Cr (24)		Mn (25)		Fe (26)	
5	Rb (37)		Sr (38)		Y (39)		Zr (40)		Nb (41)		Mo (42)		Tc (43)		Ru (44)	
6	Cs (55)		Ba (56)		La (57)		Ce (58)		Pr (59)		Nd (60)		Pm (61)		Sm (62)	
7	Fr (87)		Ra (88)		Ac (89)		Th (90)		Pa (91)		U (92)		Np (93)		Pu (94)	
8	K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe	
9	Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru	
10	Cs		Ba		La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm	
11	Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu	
12	K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe	
13	Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru	
14	Cs		Ba		La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm	
15	Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu	

Рис. 2. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

с валентной конфигурацией  $(n-1)d^xns^1$  и  $(n-1)d^xns^2$ ,  $x=1-10$ , относятся к  $d$ -семейству.

К  $f$ -элементам относятся лантаноиды и актиноиды. В приведенной нами Периодической системе они размещены в побочных подгруппах **С** с указанием валентной электронной конфигурации (рис. 2).

В Периодической системе Д. И. Менделеева каждому элементу выделена отдельная клеточка, кроме вынесенных в отдельные два ряда лантаноидов и актиноидов, а также водорода, размещаемого в I и VII группах из-за сходства с щелочными элементами и галогенами. В своих реакциях он может участвовать в виде нейтрального атома либо в виде катиона  $H^+$  или гидрида иона  $H^-$ . Для щелочных элементов и галогенов типичным свойством является образование однозарядных ионов – катионов для первых и анионов для вторых.

Принимая во внимание исходные принципы построения Д. И. Менделеевым системы элементов и сложившиеся представления об электронной структуре их атомов, попытаемся смоделировать современную систему из 118 элементов, включая лантаноиды и актиноиды. Для размещения последних необходимо увеличить общее число рядов с 10 до 15. Периоды 6 и 7 будут содержать по 4 ряда с 32 элементами. В этих сверхбольших периодах каждая группа, начиная со второй, должна состоять из трех подгрупп – главной **A** (для  $s$ - и  $p$ -элементов), побочных **B** (для  $d$ -элементов) и **C** (для  $f$ -элементов с их индивидуальными свойствами), у всех лантаноидов и актиноидов во внешнем слое по два электрона ( $6s^2$  и  $7s^2$ ).

В современных периодических системах и таблицах элементов порядок их размещения в подгруппах связан с электроотрицательностью [5]. Менее электроотрицательная подгруппа элементов расположена в группе слева, а более электроотрицательная – справа. В связи с этим подгруппа **A** щелочных и щелочноземельных элементов в I и II группах образует левый столбец, а подгруппа **B** – правый. Начиная с III группы подгруппа **A** уже расположена

справа, а подгруппы **B** и **C** – слева и также с учетом электроотрицательности в них элементов (подгруппа **C** в середине I и III групп и слева в IV–VIII группах). Такое расположение нашло отражение в приведенной нами Периодической системе (см. рис. 2).

Лантаноиды следуют за лантаном, элементом III группы. Каждый последующий элемент смещается на одну клеточку по мере возрастания заряда ядра. Пять элементов (Ce, Pr, Nd, Pm, Sm) располагаются в 8-м ряду и каждый в подгруппе **C** своей группы. Европий и иттербий, имея в нормальном состоянии два внешних валентных электрона  $6s^2$  и стабильную  $4f$ -оболочку ( $f^7$  и  $f^9$ ) образуют наиболее типичные для них двухвалентные соединения. Поэтому мы поместили их во II группу, с них начинаются ряды 9 и 10. Аналогичным образом размещены в 7-м периоде актиноиды с зарядом ядер 90–103, и далее следуют искусственно полученные элементы, завершая заполнение данного периода.

Известны другие варианты периодических систем элементов, в частности, длиннопериодная 32-клеточная с расположением  $s$ -,  $p$ -,  $d$ - и  $f$ -элементов в виде четырех блоков, не размещающая лантаноиды и актиноиды по группам. Такие таблицы носят формальный характер и не отражают исходные принципы Д. И. Менделеева, обеспечившие открытие Периодического закона и построение Периодической системы элементов, давшей огромный толчок развитию химии и атомной физики [5].

Периодическая система позволяет дать сравнительную характеристику химическим элементам по их положению в ней. Основными атрибутами элемента являются строение электронных оболочек, конфигурация валентных электронов, радиус атома, энергия ионизации, сродство к электрону, электроотрицательность, относительная электроотрицательность, степень окисления в его соединениях, являющиеся периодической функцией заряда ядер атомов.

Радиус атомов элементов в группах с увеличением энергетических уровней воз-

растает сверху вниз, а в пределах одного периода уменьшается по мере возрастания заряда ядер атомов (лантаноидное сжатие).

Величина энергии ионизации у элементов главных подгрупп понижается сверху вниз вследствие уменьшения силы притяжения валентных электронов к ядру. При переходе от элемента к элементу в пределах одного периода наблюдается постепенное увеличение энергии ионизации, вызываемое ростом зарядов атомов при одновременном уменьшении их радиусов.

Сродство к электрону для атомов элементов одной группы понижается с ростом заряда ядра. Это связано с увеличением радиусов атомов.

Химические свойства элементов, прежде всего, определяются электронной структурой их атомов. Например, атомы всех щелочных элементов имеют одинаковую валентную конфигурацию  $ns$ . Это обуславливает их сходство в химическом отношении. Вместе с тем они проявляют ряд специфических свойств, позволяющих отличить один элемент от другого. Различие в их реакционной способности обусловлено разным числом электронных слоев, причем химическая активность возрастает в направлении понижения энергии ионизации от лития к цезию. Однако эту активность отдельных атомов элементов нельзя отождествлять с реакционной способностью простых веществ, в частности металлов.

Сравнительной характеристикой для них служит ряд стандартных электродных потенциалов, в котором литий расположен перед цезием.

Большое сходство в химическом отношении лантаноидов обусловлено тем, что атомы их содержат одинаковое количество электронных слоев и на внешнем уровне у них два электрона ( $6s^2$ ). Это ведет к ослаблению четкой периодичности свойств этих элементов. Однако к настоящему времени химия лантаноидов получила широкое развитие и свидетельствует об их существенных индивидуальных особенностях благодаря последовательному заполнению

валентного  $4f$ -уровня. Известны соединения, в которых они проявляют степень окисления не только +3, но и +2 (Eu, Yb, Sm, Nd), +4 (Ce, Tb, Pr, Dy). Для церия хорошо известны оксид  $CeO_2$  и алкоксиды  $Ce(OR)_4$ , подтверждающие его расположение в IV группе. Д. И. Менделеев из известных в то время актиноидов разместил торий в IV, а уран в VI группах. Для них были получены оксиды  $ThO_2$  и  $UO_3$ , а также уранаты, сходные с хроматами, молибдатами и вольфраматами.

Особо следует обратить внимание на элементы VIII A группы – благородные газы: гелий, у которого заполнен слой  $1s^2$ , неон, аргон, криптон, ксенон и радон, в основном состоянии которых все восемь электронов внешнего уровня  $ns^2np^6$  спарены. В отличие от таких газообразных простых веществ, как водород, азот, кислород, фтор, молекулы их одноатомные и отличаются особой устойчивостью. Это первоначально было поводом для заключения о неспособности этих элементов образовывать химические связи. Однако учитывая сильное снижение энергии ионизации их в подгруппе сверху вниз и наличие у аргона и стоящих ниже благородных газов во внешнем слое свободного  $d$ -подуровня, при возбуждении атомов произойдет спаривание электронов в результате перехода их с  $ns^2np^6$  на  $nd$ -подуровень. Первое химическое соединение на примере ксенона получено в 1962 г. Под действием ультрафиолетовых лучей криптон, ксенон и радон со фтором образуют фториды  $KrF_2$ ,  $RnF_2$ ,  $XeF_2$ ,  $XeF_4$  и  $XeF_6$ . Для ксенона были получены оксид  $XeO_4$  и перксенаты  $Na_4XeO_6$  и  $Ba_2XeO_6$ , в которых ксенон находится в высшей степени окисления +8, соответствующей номеру группы.

Химические элементы с порядковыми номерами 114–118 были получены совместно российскими и американскими физиками при бомбардировке мишени из атомов одного элемента ускоренными атомами или ионами другого элемента. Слияние их ядер осуществляется при энергиях, превышающих силы отталкивания ядер. Авторы синтезированных элементов 114–118 рекоменду-

ют для них следующие названия: флеровий  ${}_{114}^{289}\text{Fl}$ , московий  ${}_{115}^{290}\text{Mc}$ , ливерморий  ${}_{116}^{293}\text{Lv}$ , теннессин  ${}_{117}^{294}\text{Ts}$  и оганессон  ${}_{118}^{294}\text{Og}$ . Все они являются  $p$ -элементами.

Металлический и неметаллический характер простых веществ определяется электронной структурой внешнего слоя атома элемента. Вещества проявляют металлические свойства, если элементы, образовавшие их, имеют во внешнем уровне от одного до трех электронов, включая  $d$ - и  $f$ -элементы, за исключением водорода, гелия и бора. Для элементов главных подгрупп с увеличением количества электронов на их внешнем уровне металлические свойства веществ ослабевают, а неметаллические – повышаются в периодах, а в груп-

пах металлические свойства усиливаются сверху вниз. Поэтому тяжелые  $p$ -элементы, содержащие четыре или более электронов во внешнем слое, – олово, свинец, висмут, полоний – образуют элементные вещества, являющиеся металлами. Только 24 элемента образуют простые вещества с неметаллическими свойствами.

Таким образом, в современной методике химии необходимо, наряду с имеющимися данными о Периодическом законе Д. И. Менделеева как отражении периодичности заполнения электронами энергетических уровней атомов элементов, акцентировать внимание и на дальнейшее развитие данного закона в свете современной теории строения материи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Менделеев Д. И. Основы химии: изд. 8. СПб., 1906.
2. Менделеев Д. И. Научный архив. Периодический закон / отв. ред. Б. М. Кедров. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1953.
3. Архив Д. И. Менделеева. Т. 1. Л., 1951.
4. Менделеев Д. И. Сочинения. Т. 14. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1949.
5. Сиборг Г. Т., Вэлленс Э. Г. Элементы вселенной. М.: Наука, 1966. 264 с.

#### REFERENCES

1. Mendeleev D. I. *Osnovy khimii: 8th ed.*. St. Petersburg, 1906.
2. Mendeleev D. I. *Nauchnyy arhiv. Periodicheskiy zakon*. Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1953.
3. Arhiv D. I. Mendeleeva. Vol. 1. Leningrad, 1951.
4. Mendeleev D. I. *Sochineniya*. Vol. 14. Moscow–Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1949.
5. Seaborg G. T., Valence E. G. *Elementy vselennoy*. Moscow: Nauka, 1966. 264 p. (In Russian)

**Жильцов Сергей Федорович**, доктор химических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации

**e-mail: sv130297@mail.ru**

**Zhiltsov Sergey F.**, ScD in Chemistry, Professor, Honored scientist of the Russian Federation

**e-mail: sv130297@mail.ru**

**Дружкова Ольга Николаевна**, кандидат химических наук, доцент кафедры биологии, химии и биолого-химического образования, Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

**e-mail: olgadruzh@mail.ru**

**Druzhkova Olga N.**, PhD in Chemistry, Associate professor, Biology, Chemistry, biological and chemical studies Department, K. Minin Nizhniy Novgorod State Pedagogical university

**e-mail: olgadruzh@mail.ru**

**Опарина Светлана Александровна**, кандидат педагогических наук, доцент кафедры биологии, географии и химии, Арзамасский филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им Н. И. Лобачевского»

**e-mail: sv130297@mail.ru**

**Oparina Svetlana A.**, PhD in Education, Associate professor, Biology, geography and chemistry Department, National Research Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Arzamas branch

**e-mail: sv130297@mail.ru**

*Статья поступила в редакцию 23.03.2020*

*The article was received on 23.03.2020*