

DOI: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-11-78-85>

Опыт преподавания Периодического закона Д.И. Менделеева в национальном исследовательском университете

Михайлов Олег Васильевич – д-р хим. наук, проф. E-mail: olegmkhlv@gmail.com

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
Адрес: 420015, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 68

Аннотация. Обсуждены вопросы, касающиеся изложения существования Периодического закона Д.И. Менделеева в современном учебном процессе в рамках общеобразовательных и специальных химических дисциплин «Общая химия», «Неорганическая химия» и др. Отмечена некоторая некорректность как в формулировке самого Периодического закона, так и в формулировках тех положений, которые являются основополагающими в интерпретации данного закона (правило Гунда, принцип Паули, правило Клечковского). Предложены также уточнённые формулировки Периодического закона Д.И. Менделеева и каждого из трёх связанных с ним положений.

Ключевые слова: Периодический закон Д.И. Менделеева, периодичность, химический элемент, заряд ядра, электронная конфигурация

Для цитирования: Михайлов О.В. Опыт преподавания Периодического закона Д.И. Менделеева в национальном исследовательском университете // Высшее образование в России. 2019. Т. 28. № 11. С. 78-85.

DOI: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-11-78-85>

4 марта 1869 г. произошло величайшее по значимости для химической науки событие: наш соотечественник Дмитрий Иванович Менделеев на заседании Русского химического общества (РХО) представил доклад под названием «Соотношение свойств с атомным весом элементов», в котором детально изложил обнаруженный им *Периодический закон химических элементов*. Образуя, говоря, он стоит на «семи китах» [1]:

1. Элементы, расположенные по возрастанию их атомного веса, представляют явственную периодичность свойств;

2. Сходные по свойствам элементы имеют или близкие атомные веса (Ir, Pt, Os), или последовательно и однообразно увеличивающиеся (K, Rb, Cs);

3. Сопоставление элементов или их групп по величине атомного веса отвечает их т.н. атомности;

4. Элементы с малыми атомными весами имеют наиболее резко выраженные свой-

ства, поэтому они являются типическими элементами;

5. Величина атомного веса определяет характер элемента;

6. Следует ожидать открытия ещё многих неизвестных элементов, например, сходных с Al или Si, с паем (атомной массой) 65–75;

7. Величина атомного веса элемента может быть иногда исправлена, если знать аналогии данного элемента. Так, пай Te должен быть не 128, а 123–126.

Нисколько не умаляя заслуги его предшественников в формировании Периодической системы химических элементов, нельзя не отметить следующего чрезвычайно важного обстоятельства: *все* без исключения попытки систематизации химических элементов, которые предлагались до Менделеева, по существу, представляли собой не что иное, как *частные* (подчас чисто случайные) наблюде-

ния и сопоставления [2] и, соответственно, приводили лишь к тем или иным *частным* же обобщениям, лишённым тех основных признаков, которые должны быть присущи *закону природы*. Д.И. Менделеев выделяется на фоне всех прочих творцов системы химических элементов не тем, что его система была более совершенной по сравнению с другими, и не тем, что его имя уже почти полтора столетия упоминается в первую очередь (и, уверен, будет упоминаться и в будущем) во всём мире, когда речь заходит о системе химических элементов как таковой, а тем, что *до* её построения он сформулировал *периодический закон* изменения свойств химических элементов в зависимости от их атомного веса, по справедливости носящий его имя, чего до него не смог сделать *никто* из его многочисленных предшественников «по цеху». Справедливости ради следует признать, что ближайшие из них, в частности Л. Мейер и У. Одлинг, интуитивно чувствовали наличие какой-то закономерности между свойствами химических элементов и их атомным весом. По этому поводу Мейер (имя которого, кстати, значитя вторым после Менделеева в перечне тех, кто так или иначе причастен к открытию Периодического закона) писал: «Нельзя сомневаться, что имеется определённая закономерность в численных значениях атомных весов». Ещё более определённо высказывался Одлинг: «Несомненно, что некоторые из арифметических соотношений, представленных в моей таблице (химических элементов. – О.М.), являются просто случайными, но взятые в общем они слишком многочисленны и чётко выражены, чтобы не зависеть от какого-то до сих пор неизвестного закона» [3, с. 220]. И закон этот был открыт Д.И. Менделеевым независимо от работ его предшественников.

Опираясь на найденную им закономерность в изменении свойств химических элементов в зависимости от их атомного веса, Менделеев в конце 1870 г. представил в РХО новый доклад «Естественная система элементов и применение её к ука-

занию свойств неоткрытых элементов», в котором предсказал свойства неоткрытых ещё элементов – аналогов бора, алюминия и кремния (названных им соответственно экабор, экаалюминий и экасилиций) [2; 4]. А в следующей по хронологии работе «Периодическая законность химических элементов», опубликованной в 1871 г., он дал и более ёмкую формулировку Периодического закона: «Свойства элементов, а потому и свойства образуемых ими простых и сложных тел стоят в периодической зависимости от атомного веса» [2–4], которая стала общепринятой и оставалась таковой как минимум до начала XX в.

Написал «оставалась таковой», потому что Д.И. Менделеев заложил в своё определение термин «атомный вес», ибо в то время именно атомный вес был фактически единственной характеристикой атомов, которую можно было определить экспериментально; после же введения в научный оборот понятия «заряд ядра (нуклида)» в определение Периодического Закона было внесено уточнение, и в современных учебниках химии он трактуется несколько иначе, а именно: «Свойства простых веществ, а также свойства и формы соединений элементов находятся в периодической зависимости от заряда ядра атомов элементов» (см., например, [5, с. 35]). (К слову сказать, уже сам Менделеев обнаружил, что при использовании атомного веса в качестве исходного параметра в отдельных случаях имеет место отклонение от найденной им периодической закономерности. Так, элемент «теллур» ему пришлось поставить впереди элемента «йод», хотя атомный вес йода был меньшим, нежели атомный вес теллура.

Однако и приведённое в работе [5] определение нуждается в уточнении, причём как минимум по двум причинам. Дело в том, что, во-первых, под *периодической* зависимостью в математике вообще-то понимается такая функция $f(x)$, для которой можно указать как минимум одно значение параметра T , для которого $f(x+T) = f(x)$ при *любом* значе-

нии x (классическими примерами таких зависимостей являются тригонометрические функции, изучаемые в курсе математики в средней школе). В нашем же случае для соответствия вышеуказанному определению периодической зависимости для количественного параметра p , характеризующего то или иное конкретное свойство химического элемента, зависящее от заряда ядра Z , должно иметь место равенство $p(Z) = p(Z+T)$, что на самом деле не имеет места *ни для одного* из известных на сегодняшний день свойств химических элементов. При этом зависимости $p(Z)$ могут быть в той или иной степени близкими к периодическим зависимостям, однако в любом случае они не будут строго периодическими, как это требуется согласно тому определению, что принято в математике. А во-вторых, нельзя не отметить, что существуют и такие свойства химических элементов, которые не находятся не то что в периодической зависимости от величины Z , но даже и в близкой к ней; примером может служить, например, усреднённая атомная масса химического элемента, которая монотонно возрастает с ростом заряда ядра атома Z . С учётом всего сказанного выше наиболее корректной представляется следующая формулировка Периодического закона Д.И. Менделеева: *«Большинство свойств химических элементов и их соединений находится в близкой к периодической зависимости от заряда соответствующих им нуклидов (атомных ядер)»*. Уточнения здесь хоть и небольшие, но, по нашему мнению, имеющие принципиальное значение, которые обязательно нужно принимать во внимание при преподавании Периодического закона Д.И. Менделеева (причём не только в различных вариациях учебной дисциплины «Химия» в учреждениях высшего образования, но и, наверное, в классическом школьном курсе химии). Допускаю, что кому-то эти самые уточнения покажутся несущественными, однако следует помнить немецкую поговорку, идущую от легендарного Мефистофеля: «Дьявол кроется в мелочах». Тем более это

нужно иметь в виду в тот самый год, когда будет отмечаться третий по счёту, а именно 150-летний юбилей с момента появления на свет этого самого закона (напомним в связи с этим, что юбилейными считаются лишь те годы с момента наступления того или иного события, числа которых кратны 50).

Д.И. Менделеев *вскрыл факт* закономерного изменения свойств химических элементов с ростом атомного веса (в настоящее время вместо словосочетания «атомный вес» принято использовать словосочетание «атомная масса») и сформулировал Периодический закон, *но не смог объяснить причину* феномена периодичности, в его формулировке заложенной, что, в общем-то, вполне естественно, если вспомнить следующее. С одной стороны, собственно этой проблематикой, как это ни парадоксально, он занимался далеко не всю жизнь (по сведениям некоторых его биографов, не более пяти лет), что вполне вписывалось в его специфический характер. Дмитрий Иванович был прежде всего учёным-«системником», а не «отраслевиком», каковыми являлись многие из его современников (ныне – подавляющее большинство в мире науки), и потому длительное занятие чем-то одним, пусть даже и чрезвычайно важным для соответствующей отрасли науки, ему просто претило. С другой стороны, он не был до конца дней своих уверен даже... в самом существовании атомов (чего стоит одно лишь его изречение по данному поводу: *“в атоме много простоты, но нет наглядности”*). Ну а с третьей стороны (если можно здесь так выразиться!), и это главное, в течение всего периода многогранной научной деятельности Д.И. Менделеева так и не появилось сколько-нибудь значимой теории строения атома, без которой понять эту самую *причину* просто невозможно. В достаточно строгом виде такая теория сформировалась лишь в двадцатых годах XX столетия, спустя почти двадцать лет после кончины творца Периодического закона.

В процессе преподавания данной теории в рамках курса общей и неорганической химии в современных российских университетах периодичность в изменении свойств химических элементов трактуется как результат периодического повторения электронных конфигураций внешних электронных оболочек атомов с ростом величины заряда ядра атома Z . К примеру, в т.н. «короткопериодическом варианте» Периодической системы (который, кстати, является наиболее популярным в учебном процессе в российских университетах, причём как среди студентов, так и среди преподавателей [6]) для элементов главной подгруппы IV группы: C, Si, Ge, Sn, Pb, Fl – таковыми будут ns^2np^2 , для элементов главной подгруппы VI группы: O, S, Se, Te, Po, Lv – ns^2np^4 , где значения n (т.н. *главного квантового числа*) составляют соответственно 2, 3, 4, 5, 6 и 7, для элементов побочной подгруппы VII группы: Mn, Tc, Re, Bh – $(n-1)d^5ns^2$ ($n=4, 5, 6$ и 7 соответственно). При этом, понятно, расшифровывается, что стоит за символами s, p, d (а также f , а иногда ещё и g), а именно атомные орбитали (АО), на которых-то и располагаются в определённом числе и по определённым правилам электроны в атоме. Указывается, что они отличаются между собой значениями т.н. *орбитального квантового числа* l , равного 0 для s -АО, 1 – для p -АО, 2 – для d -АО, 3 – для f -АО, 4 – для g -АО. Сообщается также, что на любой s -АО может разместиться максимум 2 электрона, на p -АО – 6, на d -АО – 10, на f -АО – максимум 14 электронов и т.д., а также то, что заполнение электронами этих самых АО в соответствии с принципом минимума энергии происходит в строго определённом порядке. Приводится и последовательность их заполнения, а именно $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f...$ (см., например, [5, с. 27]). В связи с этим упоминаются два положения, а именно принцип Паули: «В атоме не может быть двух электронов с одинаковыми значениями всех квантовых чисел» – и правило Хунда: «суммарное спиновое число электронов данного подслоя должно быть максимальным»

[5, с. 29]. Близкое к этому определение приведено и на сайте в Wikipedia [7].

Не вдаваясь здесь в «глубины» современной теории строения атома, заметим, что и приведённых выдержек из неё, в общем-то, вполне достаточно для того, чтобы понять периодичность (а точнее – квазипериодичность, ибо, как уже указывалось нами, периодичности как таковой в строго математическом смысле здесь нет). Для этого следует лишь заполнять АО в соответствии с приведённой выше последовательностью, и периодическая повторяемость электронных конфигураций (в том числе и тех, что были представлены нами для поименованных выше элементов IV, VI и VII групп Периодической системы) проявится во всём своём блеске. Всё это, как показывает опыт преподавания Периодического закона автором этих строк, в принципе способен понять и творчески использовать на практике *любой* студент, изучающий университетский курс общей химии. Однако этот же опыт позволил сделать и другой вывод: если излагать данную тему в точности так, как это сделано чуть выше, то студент в основной своей массе усваивает её не творчески, а скорее догматически. А всё потому, что здесь опять-таки срабатывает известный принцип Мефистофеля: «дьявол кроется в мелочах». Вот на них-то и хотелось бы остановиться подробнее.

Начать с того, что ни в одном из учебников химии – ни века прошлого, ни века нынешнего – мне не удалось найти хоть какого-то пояснения относительно того, откуда «есть-пошла» та самая последовательность в заполнении АО, которая приведена нами выше. Запомнить её, конечно, можно, а вот продолжить далее... А между тем, как хорошо известно, любая вещь запоминается гораздо легче и надёжнее, когда стремящемуся зафиксировать её в своей памяти человеку известна закономерность в расположении отдельных фрагментов, её составляющих. Удивительно, но почему-то никто до сих пор так и не догадался в процессе изучения темы

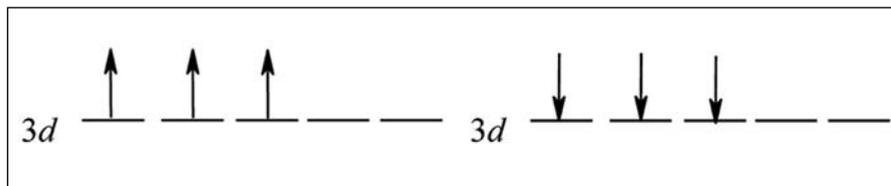


Рис. 1. Возможные взаимные расположения трёх электронов на пяти $3d$ -АО, подпадающие под правило Хунда

«Периодический закон Д.И. Менделеева» привести эту самую закономерность, которая прямо вытекает из достаточно давно известного положения под названием «правило Клечковского», описанного её автором более полувека назад в [8; 9, с. 290–292]. Удивительно потому, что формулировка его довольно проста и включает в себя два пункта:

- заполнение электронами атомных орбиталей происходит в порядке возрастания суммы их главных (n) и орбитальных (l) квантовых чисел (т.е. чем больше $(n+l)$, тем выше энергия данной АО);

- при равенстве указанной суммы $(n+l)$ для двух или большего числа АО заполнение их происходит в порядке роста главного квантового числа n .

Многолетний опыт автора данной статьи по преподаванию Периодического закона в рамках общеобразовательной дисциплины «Химия» свидетельствует о том, после ознакомления с этим самым правилом даже не слишком обременённый знаниями и интеллектом студент обычно не только самостоятельно выводит вышеуказанную последовательность заполнения АО, но и довольно-таки легко продолжает её далее. (В частности, без особых проблем делает вывод, что последний (пока что) седьмой период Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева должен завершаться элементом № 118, а с элемента № 121 должна начаться новая, пока что неизвестная категория химических элементов – т.н. «октадеканиды», каковых должно быть 18). А затем осуществляет заполнение этих самых АО электронами. Как уже упоминалось выше, при таком заполнении работает пра-

вило Хунда, согласно которому «суммарное спиновое квантовое число электронов данного подслоя должно быть максимальным» [5; 7]. В [7] на этот счёт дано дополнительное разъяснение, а именно: «Это означает, что в каждой из орбиталей подслоя заполняется сначала один электрон, а только после исчерпания незаполненных орбиталей на эту орбиталь добавляется второй электрон». Ну и, вероятно, для того чтобы сие положение было понятно не только обучающемуся студенту, но и, так сказать, «человеку с улицы», на этом же самом сайте приведено некое мнемоническое «правило трамвайного вагона»: «Ты приглядишься, решив присесть/ К местам трамвайного вагона/ Когда ряды пустые есть/ Подсаживаться нет резона». Казалось бы, всё ясно, однако... возникают определённые проблемы, касающиеся относительного расположения электронов в рамках одной и той же АО (или, что то же самое, в пределах одного энергетического уровня). Дело в том, что согласно этому самому правилу при распределении, скажем, трёх электронов на пяти $3d$ -АО возможны, в частности, такие варианты, которые показаны на *рисунке 1* (напомним в связи с этим, что отдельно взятые АО ныне принято отображать в виде отдельных чёрточек, а электроны на них – стрелками, причём стрелка, направленная вверх, символизирует электрон с условным направлением вращения вокруг своей оси по часовой стрелке, а стрелка, направленная вниз, – электрон с условным направлением вращения вокруг своей оси против часовой стрелки).

Поскольку электрону, «стрелка» которого направлена вверх, условно придаётся

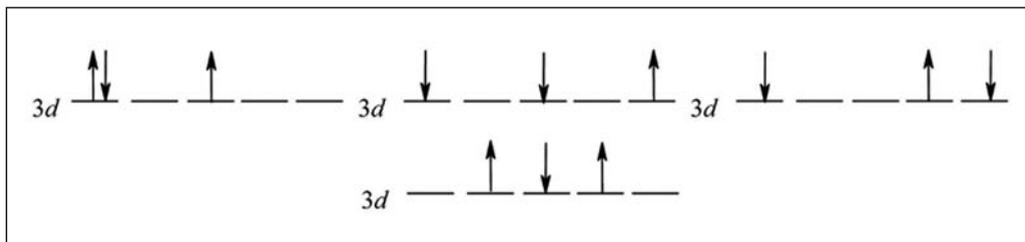


Рис. 2. Возможные взаимные расположения трёх электронов на пяти $3d$ -АО, не подпадающие под правило Хунда

положительное значение ещё одного квантового числа, а именно спинового $s = +1/2$, а электрону, «стрелка» которого направлена вниз, $s = -1/2$, то получается, что первое из этих расположений характеризуется суммарным спиновым квантовым числом $(+3/2)$, тогда как второе – суммарным спиновым квантовым числом $(-3/2)$, а следовательно, правилу Хунда в его приведённой выше формулировке соответствует лишь первое из них, но никак не второе. Между тем оба эти расположения в действительности энергетически эквивалентны друг другу, и коли так, то в формулировке этого самого правила вместо словосочетания «суммарное спиновое квантовое число электронов» должно фигурировать: «модуль суммарного спинового квантового числа электронов». Это уточнение, безусловно, важно, но не это главное. Зададимся вот каким вопросом: ведь три электрона на этих же самых $3d$ -АО можно разместить ещё не одним и не двумя разными способами, например, теми, что показаны на *рисунке 2*.

Могут ли быть на практике такие расположения электронов? Большинство студентов почти без тени сомнения отвечают на этот вопрос отрицательно. А в качестве аргумента в пользу такого вывода ссылаются... на приведённую выше формулировку правила Хунда (!), которая, действительно, не стыкуется ни с одним из четырёх расположений электронов, показанных на *Рис. 2* (хотя три последних, между прочим, вполне вписываются в упомянутое выше «правило трамвайного вагона»). На самом же деле та-

кие расположения реально существуют, но никакого противоречия с правилом Хунда при этом не возникает, ибо данное правило относится к взаимному расположению электронов лишь в т.н. *основном* состоянии, т.е. состоянию с наиболее низкой энергией. Расположения же, показанные на *Рис. 2*, существуют, но имеют более высокие по сравнению с основным состоянием значения энергий (и называются собирательным термином «возбуждённые состояния»). Так что в формулировку правила Хунда, равно как и в формулировку Периодического закона Д.И. Менделеева, следует внести определённые уточнения, и звучать данное правило, по мнению автора этих строк, должно следующим образом: «*В основном состоянии (т.е. состоянии с наименьшим значением суммарной энергии) электроны располагаются таким образом, чтобы модуль суммарного спинового квантового числа электронов был бы максимальным*». Заметим в связи с этим, что такова должна быть формулировка лишь *первого* правила Хунда, потому что на самом деле их не одно, а целых три, но обсуждение двух остальных, во-первых, уже явно выходит за рамки данной статьи, а во-вторых, для понимания сущности Периодического закона и его интерпретации с позиций современной теории строения атома они особого значения не имеют, и потому мы не будем на них останавливаться. Тем не менее всё же заметим, что небольшое уточнение следует внести и в формулировку ещё одного важного положения, имеющего пусть и меньшее, чем правила Клечковского и Хунда, но

все же достаточно существенное значение для понимания причин феномена периодичности, а именно принципа Паули, который следует давать в такой редакции: «*В атоме не может быть даже двух электронов с одинаковыми значениями всех квантовых чисел*». Эта формулировка, как нетрудно заметить, отличается от приведённой выше традиционной наличием лишь одного слова – «даже». На наш взгляд, оно здесь необходимо, ибо после ознакомления с традиционной формулировкой у любого думающего студента останется некий налёт неоднозначности – понятно, двух таких электронов быть не может, а вот три, четыре или ещё больше – может? Добавление слова «даже» эту неоднозначность однозначно – простите за невольный каламбур – устраняет.

В заключение данного повествования хочется напомнить пророческие слова самого творца Периодического закона, сказанные им уже после того, как закон прочно занял своё место в науке среди других основополагающих законов Природы: «*Периодическому закону не угрожает разрушение, а лишь надстройка обещается*». И «*надстройка*» эта проявляется не только в создании весьма значительного (как минимум несколько сотен) числа вариантов интерпретации данного закона (т.н. периодических систем химических элементов [10; 11]), но и в уточнении формулировок как самого закона, так и тех положений, которые имеют к нему непосредственное отношение.

Литература

1. Менделеев Д.И. Соотношение свойств с атомным весом элементов // Журнал Русского химического общества. 1869. Т. 1. С. 60–67.
2. Миттова И.Я., Самойлов А.М. История химии с древнейших времён до конца XX века: Учеб. пособие. В 2 т. Долгопрудный: Интеллект, 2012. Т. 2. С. 120–174.
3. Некрасов Б.В. Основы общей химии. М.: Химия, 1965. Т. 1. 518 с.
4. Левченко С.И. Краткий курс истории химии. Ростов: Изд-во ЮФУ, 2013. С. 57–67.
5. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. Изд. 8-е. СПб.: Лань, 2014.
6. Михайлов О.В. Альтернативные варианты Периодической системы химических элементов в учебном процессе // Высшее образование в России. 2016. № 5. С. 156–160.
7. Wikipedia. Правило Хунда. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Правило_Хунда
8. Клечковский В.М. К вопросу о последовательности термов в спектрах многоэлектронных атомов // Журнал эксперим. и теор. физики. 1953. Т. 25. № 2. С. 179–187.
9. Клечковский В.М. Распределение атомных электронов и правило последовательного заполнения (n+l)-групп. М.: Атомиздат, 1968. 432 с.
10. Имянитов Н.С. Уравнения для...закона Менделеева // Природа. 2002. № 6. С. 62–69.
11. Mazurs E.G. Graphic Representations of the Periodic System During One Hundred Years. 2nd edition. Alabama, 1974. 224 с.

Статья поступила в редакцию 09.01.19

Принята к публикации 08.10.19

Experience in Teaching Mendeleev's Periodic Law at National Research University

Oleg V. Mikhailov – Dr. Sci. (Chemistry), Prof., Chair of Analytical Chemistry, Certification and Quality Management, e-mail: olegmkhlv@gmail.com

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Address: 68, Karl Marx str., Kazan, 420015, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Abstract. The article discusses the questions concerning the presentation of the essence of the D.I. Mendeleev's Periodic Law in the modern educational process in the framework of general educational and special chemical disciplines “General Chemistry”, “Inorganic Chemistry” and others. Some incorrectness have been noted both in the formulation of the Periodic Law itself and in the

formulations of principles that are fundamental to the interpretation of this law (Hund's rule, Pauli's principle, Klechkovsky's rule). Also, the article proposes the amended formulations of Mendeleev's Periodic Law and each of these three principles.

Keywords: Mendeleev's Periodic Law, periodicity, chemical element, nuclear charge, electronic configuration

Cite as: Mikhailov, O.V. (2019). Experience in Teaching Mendeleev's Periodic Law at National Research University. *Vysshee Obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. Vol. 28, no. 11, pp. 78-85. (In Russ., abstract in Eng.)

DOI: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-11-78-85>

References

1. Mendeleev, D.I. (1869). [The Ratio of Properties with the Atomic Weight of Elements]. *Zhurnal Russkogo khimicheskogo obshchestva* [Journal of Russian Chemical Society]. Vol. 1, pp. 60-67. (In Russ.)
2. Mittova, I.Ya., Samoilo, A.M. (2012). *Istoriya khimii s drevneishikh vremen do kontsa XX veka: Uchebnoe posobie* [The History of Chemistry from Ancient Times to the End of the XXth Century: Tutorial]. Vol. 2. Dolgoprudnyi: Intellekt Publ., pp. 120-174. (In Russ.)
3. Nekrasov, B.V. (1965). *Osnovy obshchei khimii* [Basics of General Chemistry]. Vol. 1. Moscow: Khimiya Publ., 518 p. (In Russ.)
4. Levchenkov, S.I. (2013). *Kratkii kurs istorii khimii* [Brief Course of the History of Chemistry]. Rostov: Southern Federal Univ. Publ., pp. 57-67 (In Russ.)
5. Akhmetov, N.S. (2014). *Obshchaya i neorganicheskaya khimiya* [General and Inorganic Chemistry]. 8th edition. St.-Petersburg: Lan' Publ. (In Russ.)
6. Mikhailov, O.V. (2016). Alternative Versions of Periodic System of Chemical Elements in the Educational Process. *Vysshee obrazovanie v Rossii = Higher Education in Russia*. No. 5, pp. 156-160. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Hund's Rule. *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hund%27s_rules
8. Klechkovskiy, V.M. (1953). [On the Question of the Sequence of Terms in the Spectra of Many-electron Atoms]. *Zhurnal experimental'noi i teoreticheskoi fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Chemistry*. Vol. 25, no. 2, pp. 179-187 (In Russ.)
9. Klechkovskii, V.M. (1968). *Raspredelenie atomnykh elektronov i pravilo posledovatel'nogo zapolneniya (n+1)-grupp* [Distribution of Atomic Electrons and the Rule of Sequential Filling of (n+1)-Groups]. Moscow, 432 c. (In Russ.)
10. Imyanitov, N.S. (2002). [Equations for ... Mendeleev's Law]. *Priroda = Nature*. No. 6, pp. 62-69 (In Russ.)
11. Mazurs, E.G. (1974). *Graphic Representations of the Periodic System During One Hundred Years*. 2nd Edition. Alabama, 224 p.

*The paper was submitted 09.01.19
Accepted for publication 08.10.19*