

Н. Д. Минченков (студ.)<sup>а</sup>, О. Б. Зворыгина (к.х.н., доц.)<sup>б</sup>

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ЯДЕР ГЛАВНЫХ ИЗОТОПОВ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Уфимский государственный нефтяной технический университет,

<sup>а</sup> кафедра нефтехимии и химической технологии

<sup>б</sup> кафедра физической и органической химии

450064, г. Уфа, ул. Космонавтов 1; e-mail: nminch02@mail.ru

N. D. Minchenkov, O. B. Zvorygina

## REGULARITIES OF THE QUANTITATIVE COMPOSITION OF THE NUCLEI OF THE MAIN ISOTOPES OF CHEMICAL ELEMENTS

Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: nminch02@mail.ru

Рассмотрены закономерности и связь изменения количественных соотношений нуклонов в ядрах наиболее распространенных или наиболее устойчивых изотопов химических элементов с 1 по 118. В первую очередь изучается отношение  $Z/A^{2/3}$ , которое пропорционально энергии связи, определяются зависимости массового числа и других количественных характеристик ядра главных изотопов элементов от порядкового номера. Делается прогноз массовых чисел для некоторых элементов 8 периода. На основании полученных закономерностей делаются выводы о тенденциях в перегруженности ядер сверхтяжелых элементов протонами. Установлено, что основные изотопы химических элементов имеют тенденцию к увеличению перегруженности своих ядер протонами.

**Ключевые слова:** атомное ядро; восьмой период периодической системы; магическое ядро; массовое число; нуклоны; периодическая система химических элементов; сверхтяжелые химические элементы; элемент №119; элемент №126; энергия связи атомного ядра.

Периодический закон является одним из основополагающих законов естествознания и эмпирически описывает явление периодичности в химических и атомарных свойствах элементов. Определенная периодичность наблюдается в закономерностях радиоактивных распадов, энергий связи изотопов одного элемента, суммарного спина и т.д. Обобщение этих свойств привело к созданию оболочечной теории атомного ядра<sup>1</sup>. Аналогично порядку заполнения электронных уровней,

The paper examines the patterns and relationship of changes in the quantitative ratios of nucleons in the nuclei of the most common or most stable isotopes of chemical elements from 1 to 118. First of all, the  $Z/A^{2/3}$  ratio, which is proportional to the binding energy, is studied, and the dependences of the mass number and other quantitative characteristics of the core of the main isotopes of elements on the ordinal number are determined. A prediction of mass numbers is made for some elements of the 8th period. Based on the obtained patterns, conclusions are drawn about trends in the overload of superheavy element nuclei with protons. It has been established that the main isotopes of chemical elements tend to increase the overload of their nuclei with protons.

**Key words:** atomic nucleus; binding energy of the atomic nucleus; element No.119; element No.126; magic nucleus; mass number; nucleons; periodic table of chemical elements; superheavy chemical elements; the eighth period of the periodic table.

определенный порядок заполнения ядерных оболочек объясняет явления, ранее описываемые лишь эмпирически. Например, это относится к правилу запрета Маттауха-Шукарева, устанавливающему невозможность существования двух стабильных изобаров, заряд которых отличается на единицу.

Порядок заполнения электронных и ядерных оболочек обусловлен одними и теми же принципами – минимумом энергии и принципом запрета Паули. Учитывая этот факт, логично предполо-

Дата поступления 01.07.24

жить о существовании глубокой связи между порядком заполнения ядерных и электронных оболочек. Это подтверждается представлением ядерных структур атомов в виде таблицы, аналогичной периодической системе химических элементов<sup>2</sup>. Отличие заключается лишь в том, что элементы 15–18 групп 2–7 периодов переносятся из конца таблицы в ее начало. Вообще, свойства атомного ядра сильно зависят от массового числа и соотношения протонов и нейтронов<sup>3</sup>. То есть от рассмотрения периодичности и закономерностей ядерно-физических свойств элементов можно перейти к рассмотрению пропорциональных им количественных отношений протонов и нейтронов в ядре. Важной задачей является нахождение той характеристики ядра, изменение которой в ряду главных изотопов химических элементов позволило бы нам ответить на вопросы о количественных закономерностях в их ядрах и массах еще не открытых элементов.

### Методология исследования

Энергия связи атомного ядра, в частности удельная энергия связи – это одна из важнейших характеристик, определяющая прочность ядра. Энергия связи ядра находится в тесной корреляции с отношением числа протонов в нем к массовому числу, взятому в степени  $2/3$ , то есть  $Z/A^{2/3}$ , что пропорционально поверхностной плотности заряда. На этой корреляции основаны многие полуэмпирические формулы для вычисления энергии связи ядра<sup>3, 4</sup>.

Для всех химических элементов было вычислено отношение  $Z/A^{2/3}$ . Для этого у каждого элемента был взят один самый распространенный или самый стабильный изотоп и построен график, отражающий зависимость этой величины от порядкового номера (рис. 1). Также для ряда всех химических элементов были построены графики, отражающие зависимость массового числа от заряда (рис. 2) и количества нейтронов от заряда (рис. 3).

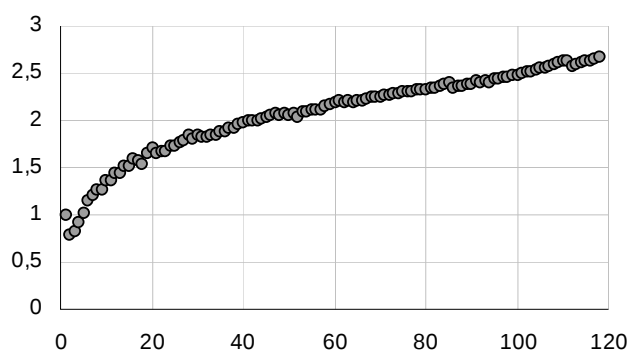


Рис. 1. Зависимость  $Z/A^{2/3}$  от порядкового номера

### Результаты и их обсуждение

Начнем с рассмотрения закономерностей изменения отношения  $Z/A^{2/3}$  и пропорциональной ему поверхностной плотности заряда ядер. По полученному графику видно, что для водорода (первая точка) отклонение рассматриваемой величины от общего тренда достаточно велико. Это объясняется тем, что в случае водорода мы получаем поверхностную плотность заряда протона, а протон по своим свойствам, естественно, отличается от составного ядра. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать закономерности в ряду значений поверхностной плотности элементов без водорода.

Полученный график без водорода точнее всего описывается двумя функциями – логарифмической и степенной. Однако степенная, на наш взгляд, описывает его точнее: при аппроксимации множества точек уравнением

$$\frac{Z}{A^{2/3}} = 0.4894 \ln Z + 0.2021 \quad (1)$$

коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9836$ , а при использовании выражения

$$\frac{Z}{A^{2/3}} = 0.6865 \cdot Z^{0.2821} \quad (2)$$

$R^2 = 0.9897$ .

Точная аппроксимация множества точек функцией некоторого типа является необходимым, но не достаточным условием для того, чтобы констатировать, что величина изменяется именно по такому закону. Поэтому на данном этапе неясно, какой функцией будет правильнее описать полученный график.

Может показаться, что монотонный характер зависимости поверхностной плотности заряда от порядкового номера элемента не согласуется с положениями оболочечной теории строения ядра, предпосылками к созданию которой были в том числе наблюдения периодичности в некоторых свойствах ядер. Однако это не так, ведь лишь размещением нуклонов по строго определенным состояниям можно объяснить функциональное изменение ядерных свойств.

Функциональный характер носит и зависимость массового числа от заряда ядра элемента (рис. 2).

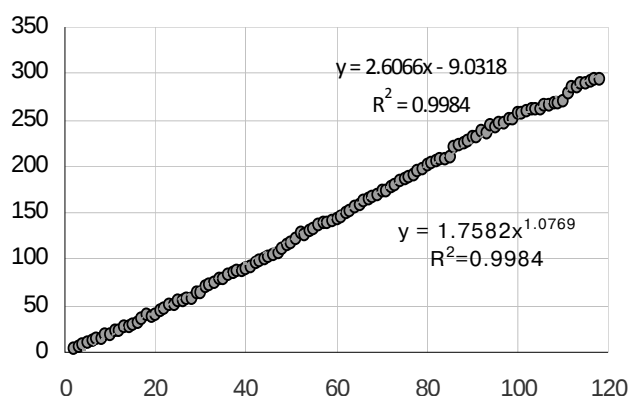


Рис. 2. Зависимость массового числа от порядкового номера элемента

В данном случае возможно с одинаковой точностью описать график линейной и степенной функцией. Для начала следует рассмотреть это с позиций линейной зависимости. Поскольку массовое число является суммой количеств протонов и нейтронов, то есть  $A = Z + N$ , то в общем виде линейное уравнение  $A = kZ + m$  можно представить как  $N + Z = kZ + m$ , то есть  $N = (k - 1)Z + m$ . Это значит, что угловые коэффициенты уравнений зависимости массового числа и числа нейтронов от заряда должны отличаться на 1:

$$A = 2.6066Z - 9.0318; \quad (3)$$

$$N = 1.6066Z - 9.0318. \quad (4)$$

Это подтверждается аппроксимацией графика  $N-Z$  линейной функцией (рис. 3):

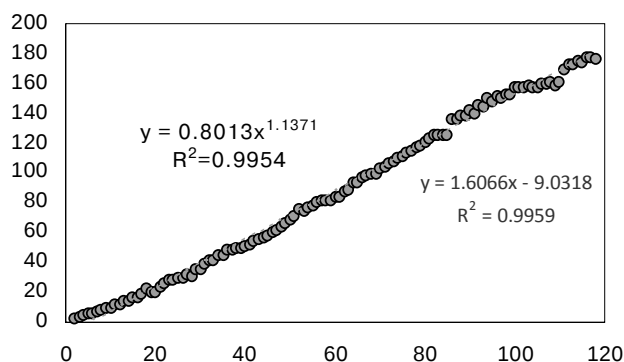


Рис. 3. Зависимость числа нейтронов от порядкового номера элемента

Свободный член уравнений 3 и 4 отрицателен, и значения функции массового числа становятся меньше 0 при  $Z < 3.46$ , т.е. это элементы H, He и Li, а значения функции нейтронов переходят в отрицательную область при  $Z < 5.62$ , т.е. это элементы H, He, Li, Be и B. Очевидно, это не имеет физического смысла и данная формула принципиально неприемлема, хоть и описывает подавляющее большинство элементов достаточно точно.

При изучении закономерностей в свойствах химических элементов важным является попытка экстраполяции этих закономерностей на свойства еще не открытых элементов. Сейчас в периодической системе полностью заполнены 7 периодов. 8 период должен начинаться со 119 элемента, имеющего электронную конфигурацию  $[Og]8s1$ . Начиная со 121 элемента теоретически должна заполняться не встречавшаяся до этого 5g-орбиталь. Однако ожидается, что энергетический зазор между 5g-, 6f- и 7d-орбиталями будет настолько мал, что порядок их заполнения может нарушиться. Релятивистские эффекты не только уменьшают энергетический зазор, но и снижают стабильность d-, f- и g- орбиталей<sup>5</sup>. В работе<sup>6</sup> рассчитываются электронные конфигурации сверхтяжелых элементов (начиная с  $Z=119$ ), и показывается, что впервые 5g-электроны появляются у 125 элемента. Однако в другой работе<sup>7</sup> говорится о том, что 5g-электрон впервые появится у 126 элемента.

Говоря о свойствах ядер, необходимо вывести способ определения масс. Точное, насколько это возможно, прогнозирование масс новых элементов является принципиально важной задачей, так как именно это позволит подобрать нуклиды для синтеза наиболее устойчивого изотопа. Поскольку  $Z/A^{2/3} = 0.6865Z^{0.2821}$ , то массовое число будет выражаться так:

$$A = 1.7581Z^{1.07685}. \quad (5)$$

Как говорилось ранее, зависимость массового числа от порядкового номера может быть представлена и в степенном виде. Описание графика (рис. 2) степенной функцией дает нам уравнение

$$A = 1.7582Z^{1.0769}, \quad (6)$$

которое фактически совпадает с выведенным из зависимости  $Z/A^{2/3}$  от  $Z$  уравнением (5).

Вопрос о том, какому закону – степенному или логарифмическому подчиняется зависимость  $Z/A^{2/3}$  от  $Z$  – однозначно решается в пользу степенного закона благодаря математической связи степенных уравнений зависимости  $A$  от  $Z$  и  $Z/A^{2/3}$  от  $Z$ , которая подтверждается реальными значениями массовых чисел элементов. В целом же взаимная связь степенных уравнений, описывающих зависимость массового числа и  $Z/A^{2/3}$  от  $Z$  позволяет для решения некоторых задач уверенно отклонить не только логарифмическое выражение для описания  $Z/A^{2/3}$ , но и линейное для массового числа, учитывая также его бессмысленность по отношению к первым элементам. Однако в некоторых случаях линейное выражение для зависи-

мости массового числа от заряда оказывается более наглядным. Например, это относится к вышеупомянутой связи между выражениями для зависимостей массового числа и числа нейтронов от заряда.

Поскольку аппроксимация не была абсолютно точной, а полученная формула имеет статистический характер, то необходимо определить погрешность путем последовательного логарифмирования и дифференцирования выражения (6) с заменой дифференциалов на  $\Delta$ . Также учтем, что  $A$  является функцией  $Z$ . В результате получаем следующую формулу для расчета абсолютной погрешности:

$$\Delta A = A \cdot \frac{1.0769 \cdot \Delta Z}{Z} = 1.7582 \cdot Z^{1.0769} \cdot \frac{1.0769 \cdot \Delta Z}{Z} = 1.8934 \cdot Z^{0.0769} \cdot \Delta Z \quad (7)$$

$\Delta Z$  принимается равным половине шкалы измерения данной величины, то есть 0.5.

Рассмотрим элемент №119, с которого начинается 8 период. Во-первых, его ядро содержит нечетное число протонов, эффект спаривания не работает <sup>1</sup>, и ядро изначально дестабилизируется. Подставляя в формулу (6) значение  $Z=119$ , получаем  $A = 302.15$ . Округляем полученное значение до 302 (т.к.  $A$  – это не масса, а именно массовое число, которое может принимать лишь целые значения). По формуле (7)  $\Delta A = 1.36$ , то есть мы можем считать, что массовое число  $A = 302.15 \pm 1.36$ , то есть лежит в пределах 301...303. Центральное значение 302 соответствует, во-первых, нечетно-нечетному ядру, которые наименее стабильны. Во-вторых, оно содержит 183 нейтрона, тогда как в работе <sup>8</sup> указывается на сильный эффект сферической нейтронной оболочки  $N=184$  (магическое число для нейтронов). При этом в той же работе сказано, что, если эффект от протонных оболочек более «размазан» по  $Z$ , то для нейтронов он более «сфокусирован» на магическом числе. И логично предположить, что ядро, которому недостает одного нейтрона до окончательного заполнения оболочки, будет также менее стабильно, как атом, которому не хватает одного электрона до заполнения (или половинного заполнения) электронного подуровня. Поэтому мы можем полагать, что истинное значение массового числа будет равно именно 303, то есть будет соответствовать магическому по нейтронам нечетно-четному ядру.

Существует формула, позволяющая вычислить оптимальное отношение  $N/Z$ , соответствующее наиболее стабильному ядру с данной массой <sup>9</sup>:

$$N/Z = 0.98 + 0.015A^{2/3}. \quad (8)$$

Для ядра с  $A=303$  это соотношение будет равно 1.6567, тогда как полученное нами значение числа нейтронов дает  $N/Z = 1.5462$ , то есть ядро перегружено протонами. Не следует ожидать слишком большого периода полураспада для данного нуклида, так как эффект кулоновского отталкивания протонов может весьма сильно доминировать над эффектом стабилизации от полностью заполненной нейтронной оболочки <sup>10</sup>. Существуют даже дважды магические ядра, например, <sup>56</sup>Ni, которые являются радиоактивными из-за сильной перегруженности протонами. Однако в нашем случае отклонение от оптимального соотношения  $N/Z$  в относительной шкале меньше (6.67% против 16.64% у никеля-56), а значит и дестабилизирующий эффект будет меньше. Но не стоит исключать возможность того, что ядро 119 элемента с массовым числом 302 также будет достаточно стабильно. В работе <sup>1</sup> утверждается, что обычно максимум периода полураспада размыт в координатах  $N-Z$  (хотя, как отмечалось ранее, это в большей степени относится к протонам) и охватывает соседние с магическим нуклиды. Согласно <sup>11</sup>, даже на периферии острова стабильности наблюдается превышение экспериментально определяемого периода полураспада над расчетным. Также в работе <sup>1</sup> указывается на такой парадокс, как превышение периода полураспада для некоторых предмагических (по нейтронам) ядер по сравнению с магическими. Например, для актиния с числом нейтронов 126  $T^{1/2} = 0.17$  с, а для изотопа со 125 нейтронами – 8.2 с. С позиций оболочечной теории строения ядра это явление необъяснимо. Этот факт еще раз показывает, что все существующие теории атомных ядер, такие как капельная, оболочечная и т.д., имеют границы применимости и пригодны для описания некоторых явлений.

Особый интерес представляет собой 126 элемент, который при массе в 310 будет дважды магическим <sup>1</sup>. Ядро с  $A = 310$ , согласно формуле (8), должно иметь отношение  $N/Z = 1.667$ , для ядра <sup>310</sup>126 это отношение равняется 1.46, то есть это ядро опять же сильно перегружено протонами. Подставляя в уравнения (6) и (7) порядковый номер этого элемента и округляя до целых, можно получить значение массы  $A = 320...323$ . То есть полученная формула дает значение, отклоняющееся от ожидаемого в сторону большего числа нейтронов и характеризующееся меньшим дестабилизирующим эффектом от кулоновского отталкивания ( $N/Z$  (8) = 1.683,  $N/Z$  (реальное) = 1.5476). Изотоп с массой 321 содержит 195 нейтронов, тогда как 196 является магическим числом для нейтронов (предсказано еще Г. Сиборгом) <sup>12</sup>. В работе <sup>1</sup> указывается, что остров стабильности, образован-

ный дважды магическим ядром  $^{310}_{126}$ , может быть вытянут в координатах  $N-Z$  в сторону большего числа нейтронов. Отмечается также, что нуклоностабильными можно считать ядра этого элемента с  $N = 196...266$  ( $A = 322...392$ ), и изотоп с массой 310 не входит в их число. Рассматривая ядро с положительной погрешностью, получается дважды магическое ядро 126 элемента, но не со 184, а со 196 нейтронами в ядре, что значительно уменьшает его перегруженность протонами, а значит, делает это значение более вероятным. К тому же, ядро  $^{322}_{126}$  является четно-четным, что, как уже отмечалось, повышает стабильность по сравнению с четно-нечетным  $^{321}_{126}$ . Итак, согласно формулам (6) и (7) мы имеем два наиболее вероятных значения массового числа для 126 элемента: 322 (дважды магическое) и 321 (магическое по протонам, предмагическое по нейтронам).

Представляется интересным подробнее рассмотреть явление перегруженности ядра протонами. Функция, описывающая зависимость  $Z/A^{2/3}$  от  $Z$ , является монотонно возрастающей, в то время как ее производная имеет вид:

$$\left(\frac{Z}{A^{2/3}}\right)' = 0.1937 \cdot Z^{-0.7179}, \quad (9)$$

является убывающей и асимптотически приближается к 0 при  $Z \rightarrow \infty$ . Это значит, что с увеличением порядкового номера элемента отношение  $Z/A^{2/3}$  в самом стабильном его изотопе возрастает все медленнее, однако  $Z/A^{2/3}$  все равно стремится к  $\infty$ .

Используя уравнение (6), можно получить отношение  $Z/A$ , равное

$$\frac{Z}{A} = \frac{0.5688}{Z^{0.0769}}. \quad (10)$$

Учитывая, что  $A = Z + N$  и выражая  $Z/N$ , получается следующее отношение  $Z$  к  $N$ :

$$\frac{Z}{N} = \frac{0.5688}{Z^{0.0769} - 0.5688}. \quad (11)$$

Производная данной функции имеет вид:

$$\left(\frac{Z}{N}\right)' = -\frac{0.0437}{(Z^{0.0769} - 0.5688)^2 \cdot Z^{0.9231}}. \quad (12)$$

Как видно из формулы (11), функция убывает, ее производная (12) принимает отрицательные значения на всей области определения и является непрерывно возрастающей (стремится к 0 снизу). Это значит, что данное отношение

для ряда химических элементов убывает с замедлением. Из этого следует несколько необычный вывод: главные изотопы химических элементов с увеличением их порядкового номера имеют тенденцию к увеличению перегруженности своих ядер протонами.

Действительно, например, для 119 элемента при предсказанной массе в 303 оптимальное отношение  $N/Z$  (8) = 1.6567, а реальное – 1.5462. Если первое значение принять за единицу, то второе отклоняется от него на 6.67%. Для 126 элемента при массе в 322  $N/Z$  (8) = 1.6847, а реальное – 1.5556, то есть отклонение составляет 7.66%.

Следует обратить внимание на выражение (8), дающее оптимальное отношение числа нейтронов к числу протонов в зависимости от массового числа.

Выражение, обратное (11), представляет собой аппроксимационную формулу  $N/Z$  для главных изотопов реально существующих элементов:

$$\frac{N}{Z} = 1.7582 \cdot Z^{0.0769} - 1. \quad (13)$$

Выражая из формулы (6)  $Z$  как функцию  $A$  и подставляя это в формулу (13), получается фактическая аппроксимационная зависимость  $N/Z$  от  $A$  для главных изотопов существующих элементов:

$$\frac{N}{Z} = 1.6878 \cdot A^{0.0714} - 1. \quad (14)$$

Разность  $N/Z$  оптимального по формуле (8) и  $N/Z$  по формуле (14), полученной аппроксимацией реальных значений, равна:

$$\Delta\left(\frac{N}{Z}\right) = 0.98 + 0.015 \cdot A^{2/3} - 1.6878 \cdot A^{0.0714} + 1 = \\ = 1.98 + 0.015 \cdot A^{2/3} - 1.6878 \cdot A^{0.0714} \quad (15)$$

При  $A$ , стремящемся к  $\infty$ , разность оптимального и фактического отношения  $N/Z$  также стремится к  $\infty$ , что подтверждает вывод о том, что элементы имеют тенденцию к перегруженности протонами, и их стабильность будет снижаться.

Таким образом, зависимость массового числа от номера для ядер главных изотопов химических элементов принципиально носит степенной характер. На основании полученных закономерностей прогнозируется, что масса главного изотопа элемента №119, вероятно, составит 303, и его ядро будет магическим по нейтронам, а масса элемента №126 будет равна 322 (дважды магическое ядро). Анализ характера изменения отношения  $Z/N$  в этих ядрах показал, что главные изотопы химических элементов имеют тенденцию к увеличению перегруженности своих ядер протонами.

## Литература

1. Окунев В.С. Об островах стабильности трансактиноидов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2012. – №4. – С.13-32.
2. Волков Ю.В. Ядерные структуры // Техника и технология. – 2009. – №4. – С.107.
3. Ишханов Б.С., Степанов М.Е., Третьякова Т.Ю. Спаривание нуклонов в атомных ядрах // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2014. – №1. – С.3-19.
4. Минченков Н.Д. Новый метод расчета энергии связи атомных ядер // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2023. – №3(23). – С.115-122.
5. Скерри Э. Таблица Менделеева: век недолог? // В мире науки. – 2014. – №7-8. – С.76-81.
6. Неведов В.И., Тржасковская М.Б., Яржемский В.Г. Электронные конфигурации и периодическая таблица Д.И. Менделеева для сверхтяжелых элементов // Доклады Академии наук. – 2006. – Т.408, №4. – С.488-490.
7. Першина В. Электронная структура и химические свойства сверхтяжелых элементов // Успехи химии. – 2009. – Т.78, №12. – С.1243-1262.
8. Оганесян Ю.Ц., Дмитриев С.Н. Синтез и исследование свойств сверхтяжелых атомов. Фабрика сверхтяжелых элементов // Успехи химии. – 2016. – Т.85, №9. – С.901-916.
9. Окунев В.С. Исследование эффектов стабилизации и влияния перегруженности протонами на ядерно-физические свойства тяжелых нуклидов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2011. – №4. – С.81-98.
10. Окунев В.С. Исследование устойчивости магических, околомагических и деформированных атомных ядер // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки». – 2013. – №4(51). – С.34-55.
11. Оганесян Ю.Ц. Новая область ядерной стабильности // Вестник Российской академии наук. – 2001. – Т.71, №7. – С.590-599.
12. Сергина М.Н., Зимняков А.М. Проблемы верхней границы Периодической системы Д.И. Менделеева // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В.Г. Белинского. – 2006. – №5. – С.231-234.

## References

1. Okunev V.S. *Ob ostrovakh stabil'nosti transaktinoidov* [About the islands of stability of transactinoids]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya «Estestvennye nauki»* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences], 2012, no.4, pp.13-32.
2. Volkov Yu.V. *Yadernye struktury* [Nuclear structures]. *Tekhnika i tekhnologiya* [Technology and engineering], 2009, no.4, p.107.
3. Ishkhanov B.S., Stepanov M.E., Tretyakova T.Y. [Nucleon pairing in atomic nuclei]. *Moscow University Physics Bulletin*, 2014, vol.69, no.1, pp.1-20.
4. Minchenkov N.D. *Novyi metod rascheta energii svyazi atomnykh yader* [A new method for calculating the binding energy of atomic nuclei]. *Vestnik mladogo uchennogo UGNTU* [Bulletin of the young scientist of USPTU], 2023, no.3(23), pp.115-122.
5. Skerri E. *Tablitsa Mendeleeva: vek nedolog?* [The Periodic Table: The century is short?]. *V mire nauki* [In the world of science], 2014, no.7-8, pp.76-81.
6. Nefedov V.I., Trzhaskovskaya M.B., Yarzhemskii V.G. [Electronic configurations and the periodic table for superheavy elements]. *Doklady Physical Chemistry*, 2006, vol.408, no.2, pp.149-151.
7. Pershina V. [Electronic structure and chemical properties of superheavy elements]. *Russian Chemical Reviews*, 2009, vol.78, no.12, pp.1153-1171.
8. Oganessian Y.T., Dmitriev S.N. [Synthesis and study of properties of superheavy atoms. Factory of superheavy elements]. *Russian Chemical Reviews*, 2016, vol.85, no.9, pp.901-916.
9. Okunev V.S. *Issledovanie effektivov stabilizatsii i vliyaniya peregruzhennosti protonami na yadernofizicheskie svoystva tyazhelykh nuklidov* [Investigation of stabilization effects and the effect of proton overload on the nuclear physical properties of heavy nuclides]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya «Estestvennye nauki»* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences], 2011, no.4, pp.81-98.
10. Okunev V.S. *Issledovanie ustoychivosti magicheskikh, okolomagicheskikh i deformirovannykh atomnykh yader* [Investigation of the stability of magical, near-magical and deformed atomic nuclei]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman. Seriya «Estestvennye nauki»* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences], 2013, no.4(51), pp.34-55.
11. Oganessian Y.T. *Novaya oblast' yadernoy stabil'nosti* [A new area of nuclear stability]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Herald of the Russian Academy of Sciences], 2001, vol.71, no.7, pp.590-599.
12. Sergina M.N., Zimnyakov A.M. *Problemy verkhney granitsy Periodicheskoy sistemy D.I. Mendeleeva* [Problems of the upper bound of the Periodic table of D.I. Mendeleev]. *Izvestiya Penzenskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.G. Belinskogo* [News of the Penza State Pedagogical University named after V.G. Belinskiy], 2006, no.5, pp.231-234.