структуры двигательных способностей представляют интерес для дальнейшей разработки концепции о роли и взаимоотношениях средств и методов общей и специальной физической (психофизической) подготовки на различных этапах онтогенетического развития организма.

В раннем возрасте любые специальные (относительно локальные) педагогические воздействия в той или иной мере оказывают влияние на большинство элементов структуры двигательных способностей. По мере роста и развития организма возможности избирательного воздействия на отдельные стороны двигательной функции увеличиваются, и логично думать, что для обеспечения разносторонней подготовки требуется применение все большего числа различных тренирующих средств. Эта гипотеза имеет отношение и к методологии оценки двигательных способностей в раннем возрасте. Если гипотеза правомерна, то для всесторонней оценки двигательных способностей, как потенциальных, так и наличных, количество различных тестов должно увеличиваться или стабилизироваться по мере увеличения возраста обследуемых, пока не начнется инволюция двигательной сферы.

Отсутствие единства взглядов на различные стороны формирования двигательной активности и сущность ПФП и аморфность представлений о ее структуре является следствием того, что большинство исследований в данной области проводилось без достаточного стремления первоначально осмыслить и экспериментально обосновать общие (ведущие) закономерности и черты, присущие этим, может быть, целостным комплексам способностей.

Индуктивный подход к решению проблемы (от изучения отдельных проявлений к обобщениям), которому явно отдается предпочтение в экспериментальных исследованиях, оказался мало продуктивным. Недооценка важности системного подхода к проблеме и значения дедуктивного способа ее решения является, на наш взгляд, основной причиной невысокого (как в теоретическом, так и в практическом плане) КПД многих исследований.

В какой-то мере В.И. Филиппович, его ученики и последователи вплотную подошли к проблемам формирования двигательной активности человека, отдельные разделы которой и реализованы в данной статье.

А. И. Иванов

Потенциалы ионизации лёгких атомов

Используемые в настоящее время вариационные методы расчёта могут достаточно точно определить основные характеристики атомов. Сущность вариационного метода сводится к составлению волновой функции с множеством поддающихся подгонке параметров, которые в несколько приёмов подбираются так, чтобы получилась минимальная средняя энергия атома [1]. Хотя результаты такого решения волновых функций дают хорошее согласование с экспериментом, но оно нисколько не объясняет физическую сущность [2]. Поэтому и в наши дни не утих интерес к методам точного аналитического решения задач атомной физики [3].

В настоящей работе приводится один из возможных методов аналитического определения энергетического состояния лёгких атомов и их ионов. В методическом плане она представляет несомненный интерес простотой математического аппарата, новизной методов расчёта и сравнительно высокой степенью точности.

Атом гелия

За основу анализа энергетического состояния атома гелия нами взята модель, предложенная Н. Бором [4]. В этой модели (рис.1) два электрона с антипараллельными спиновыми моментами, направленными вдоль радиуса "вверх" и "вниз", вращаются по своим орбитам во взаимно перпендикулярных плоскостях.

В рамках теории электромагнитного поля легко показать, что при наличии тангенциальной составляющей вектора спинового магнитного момента атом оказывается неустойчивым: радиус электронной оболочки либо уменьшается, либо увеличивается.

При движении электрона его спиновый магнитный момент возбуждает дополнительное электрическое поле, вектор напряжённости которого перпендикулярен как к вектору скорости, так и к вектору основного электрического поля электрона. В результате взаимодействия основного и дополнительного электрических полей возникает сила, направленная перпендикулярно к скорости движения электрона. Появляется прецессионное движение электронной орбиты электрона.

Современная квантовая механика говорит нам, что атом водорода в основном состоянии

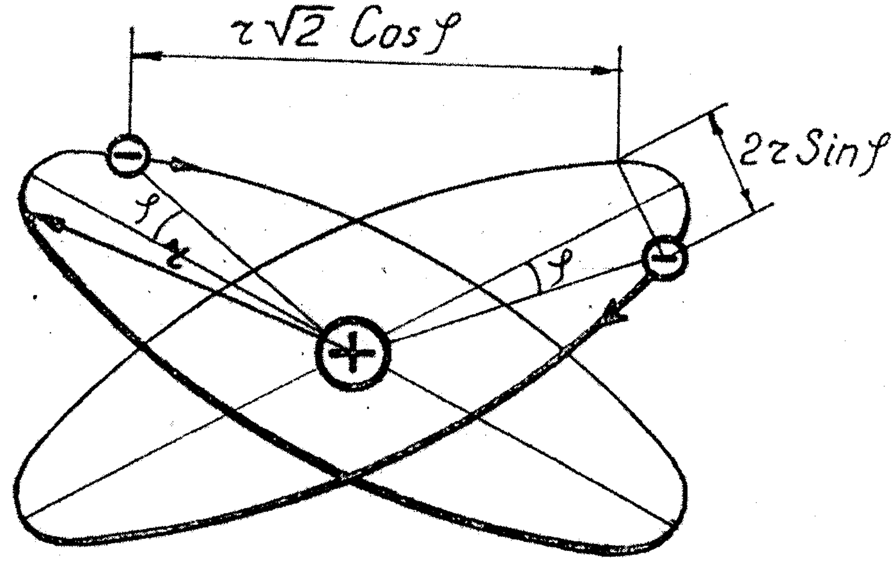

Рис. 1

следует представить себе сферически симметричным образованием, в котором электронный заряд распределён по времени в виде облака, окружающего ядро: ничто не вращается, ничто не движется. Если бы мы могли сделать моментальный снимок с временем экспозиции меньше 10^{-16} сек., то нам удалось бы различить электрон, расположенный на некотором расстоянии от ядра [5]. Подобное представление пригодно и для других атомов и молекул.

По данным на рис.1 величинам легко установить, что расстояние между электронами в атоме гелия периодически изменяется в пределах от $r\sqrt{2}$ до $2r$, и описывается это расстояние уравнением

$$R^2 = 4r^2\sin^2\varphi + 2\cdot r^2\cos^2\varphi = 2(1+\sin^2\varphi)\cdot r^2 \qquad ,(1)$$

где r – радиус электронной орбиты атома

φ – угол поворота радиус-вектора

Среднее значение расстояния $R_{ср.}$ за период вращения электрона равно, в силу симметрии, среднему его значению за четверть периода. Разбив интервал движения электрона за четверть периода на 100 частей, получим, что

$$R_{ср.} = 1{,}694427\cdot r;\ \text{или}\ \frac{1}{R_{ср.}} = 0{,}59017 \qquad (2)$$

Следовательно, среднее значение потенциальной энергии взаимодействия частей атома гелия равно

$$(W_n)_{ср.} = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}(2z - 0{,}59017), \qquad (3)$$

здесь z – электрический заряд ядра.

Кинетическая энергия двух электронов атома гелия, равная

$$W_k = 2\frac{h^2}{8\pi^2 mr^2}, \qquad (4)$$

может быть получена из соотношения

$2\pi m v r = h.$

Согласно теореме вириала для системы взаимодействующих частиц, находящихся в состоянии динамического равновесия, в том случае, когда все силы, действующие на частицы, являются внутренними по отношению к системе и если эти силы пропорциональны обратному квадрату расстояния, то средняя кинетическая энергия частиц равна половине потенциальной энергии взаимодействия всех частиц системы, взятой с обратным знаком, т.е.

$$(W_k) = \frac{1}{2}\cdot(W_n)_{ср.} \qquad (5)$$

Доказано [6], что теорема вириала в равной степени справедлива как в классической, так и в квантовой механике.

Для рассматриваемой двухэлектронной системы теорема вириала имеет вид:

$$2\frac{h^2}{8\pi^2 mr^2} = \frac{1}{2}\cdot\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\cdot(2z - 0{,}59017) \qquad (6)$$

Из уравнения (6) определяем радиус r электронных орбит:

$$r = \frac{2}{2z - 0{,}59017}\cdot\frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2}, \qquad (7)$$

где $\frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = a_0$ – радиус электронной оболочки атома водорода.

Из теоремы вириала следует, что полная

энергия атома, равная сумме потенциальной и кинетической энергий атома, равна либо половине потенциальной, либо кинетической энергии электронов, взятой с обратным знаком.

Для атома гелия имеем

$$W_0 = \frac{1}{2}W_n = -\frac{(2z - 0{,}59017)^2}{2} \cdot \frac{me^4}{8\varepsilon_0^{\,2}h^2}, \qquad (8)$$

где $\frac{me^4}{8\varepsilon_0^{\,2}h^2} = 13{,}59844$ э-в – энергия ионизации атома водорода.

Подставив численные значения величин в (8), получим полную энергию атома гелия. Она оказывается равной – 79,05413 э-в.

В ходе анализа энергетического состояния водородоподобного иона в учебной литературе показано, что потенциал второй ионизации гелия равен

$W_2 = z^2 \cdot 13{,}59844 = 54{,}39376$ э-в

Следовательно, первый потенциал ионизации атома гелия равен

79,05413 – 54,39376 = 24,66037 э-в.,

что весьма близко к экспериментальным данным

79,00519 – 54,41778 = 24,58741 э-в [7]

Заключение

1. В атоме гелия, обладающем сферической симметрией электронной оболочки, отсутствует электрический дипольный момент. Отсутствует и электрическое поле вне оболочки, т.к. линии напряжённости электрического поля начинаются на положительном заряде ядра и оканчиваются на электроне.

У атома гелия в среднем за весьма малый промежуток времени равен нулю спиновый магнитный момент, так как момент одного электрона направлен "вверх", у другого – "вниз".

Следовательно, атом гелия не проявляет признаков взаимодействия с другими атомами.

Атомы, имеющие чётное число электронов и сферическую симметрию электрического поля, не взаимодействуют между собой, потому что при этих условиях суммарный магнитный момент равен нулю. Такие атомы являются инертными.

В литературе, посвящённой проблеме гелия [6] , утверждается, что гелий инертен из-за отсутствия свободных электронных состояний и из-за большого потенциала ионизации. Второй пункт этого утверждения представляется недостаточно убедительным хотя бы потому, что атом ксенона и атом водорода имеют весьма близкие по величине потенциалы ионизации – 13,59844 и 12,1300 эВ и в то же время ксенон – газ инертный, а водород обладает наибольшей активностью к химическим соединениям, хотя электрическое поле вне оболочки у обоих атомов отсутствуют. Но в атомах водорода спиновый магнитный момент направлен у одних "вверх", "вовнутрь" – у других.

Следовательно, существуют два типа атомов водорода, которые напоминают однополюсные магниты – северный и южный. Атомы с антипараллельными спинами, довольно бурно взаимодействуя, образуют молекулу водорода с выделением значительной энергии. Атомы с параллельной ориентацией спиновых моментов не притягиваются, а отталкиваются. Для образования молекулы им достаточно найти атом с противонаправленным спиновым магнитным моментом.

2. Если в атоме водорода энергия ионизации численно равна энергии связи электрона, взятой с обратным знаком (приблизительно 13,6 э-в), то в атоме гелия и в других многоэлектронных атомах это простое соотношение не выполняется. Действительно, электроны в атоме гелия находятся в совершенно одинаковых условиях (они неразличимы), поэтому энергия связи каждого из электронов равна половине полной энергии атома – 39,5 э-в. Если сообщить атому гелия путём внешнего воздействия энергию в 24,6 э-в, то один из электронов покидает атом – энергия его связи становится равной нулю, а другой электрон переходит на низший энергетический уровень с энергией связи, равной –54,4 э-в. Атом перестраивается. Выделяющаяся при этом избыточная энергия – 39,5 – (–54,4) = 15 э-в "передаётся" первому электрону. К сообщённой извне атому энергии 24,6 э-в. прибавляется 15 э-в. Их сумма 39,5 э-в оказывается как раз достаточной для отрыва одного из электронов атома. Таким образом, количественный анализ процессов перехода электронов в атоме гелия и в других тяжёлых атомах сложнее, чем для атома водорода.

В процессе присоединения свободного электрона (с нулевой энергией связи) к ионизированному атому гелия, имеющему один электрон с энергией связи –54,4 э-в, происходит выделение электромагнитной энергии (фотона) 24,6 э-в. При этом имевшийся электрон с уровня – 54,4 э-в переходит на более высокий уровень с энергией – 39,5 э-в за счёт той энергии 15 э-в, которую отдаёт ему приходящий электрон. Кроме того, вновь присоединяющийся электрон отдаёт энергию фотону излучения

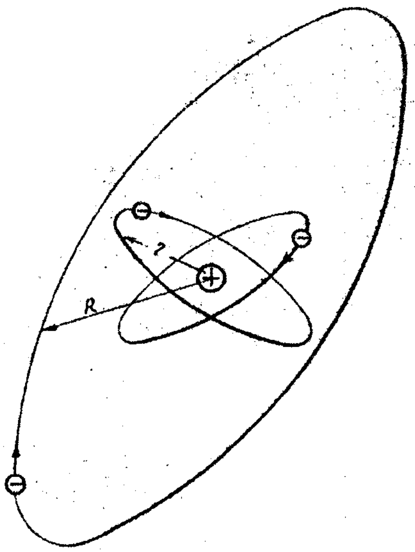

Рис. 2

24,6 э-в. Итого 39,5 э-в. Таким образом, каждый из электронов занимают уровни с энергией связи по – 39,5 э-в. Всё становится на свои места. Для атома гелия эти 15 э-в представляют собой обменную энергию.

Атом лития. Заряд ядра $z = 3$.

В атоме лития электроны находятся в состоянии $n = 1$. Они представляют собой гелиевый остов атома. Третий электрон занимает энергетический уровень $n = 2$. При этом два электрона гелиевого остова полностью компенсируют (экранируют) поле двух зарядов ядра. Следовательно, электрон внешней оболочки находится в электрическом поле одного положительного заряда ядра.

В соответствии с выполненными Н. Бором масштабными чертежами электронных орбит H, He, Li, Be и других атомов [4], электроны в состоянии $h > 2$ вращаются по эллиптическим орбитам, образуя, вследствие прецессионного движения орбит, эллипсоиды вращения. На элементарном уровне доказано, что при движении электрона по эллиптической орбите одноцентровой системы кинетическая и потенциальная энергии таковы же, как при движении по круговой орбите радиусом, равным большой полуоси эллипса и с постоянной скоростью, равной скорости электрона, когда он находится на вершине малой полуоси.

Третий электрон в атоме лития можно рассматривать как электрон в возбуждённом атоме водорода при $n = 2$. Применяя теорему вириала к такому атому

$$\frac{n^2h^2}{8\pi^2 mR_1^2} = \frac{1}{2}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 R},$$

получим уравнение для определения величины радиуса R внешней оболочки атома лития. Он равен $R = 4\,a_0$

Радиус r_1 внутренней электронной оболочки атома лития без учёта третьего электрона определяем по известной формуле при $z = 3$.

$$r_1 = \frac{2}{(2 - 0{,}50017)} = 0{,}36974a_0$$

Зная величины r_1 и R_1, можем вычислить величину полной энергии атома лития

$$W_0 = 2\frac{h^2}{8\pi^2 mr_1^2} + \frac{n^2h^2}{8\pi^2 mR_1^2};$$

получим

W_0 =(14,63313 + 0,25) · 13,59844=202,36246 э-в

Но этот результат получен без учёта взаимодействия электронов внешней и внутренней оболочек. Для решения этой части задачи вспомним, что вследствие сравнительно больших скоростей орбитального и прецессионного движений электронов на соответствующих оболочках (не менее 10^5 м/сек) электрон внешней оболочки по отношению к каждому из внутренних оболочек выглядит размазанным по

поверхности внешней плотностью $\sigma = \dfrac{e}{4\pi R^2}$

В атоме внутренние электроны притягиваются к ядру не только положительным зарядом ядра, но ещё и под действием поля отрицательного заряда внешней оболочки. Следовательно, внесение третьего электрона на внешнюю оболочку вызовет сжатие внутренней оболочки. По этой причине радиус гелиевого остова атома лития становится несколько меньше вычисленного выше. Радиус r внутренней оболочки может быть вычислен, если найдём силы взаимодействия электронов внешней и внутренней оболочек.

На приведённом рис. 3 видно, что при любом положении электрона гелиевого остова и в любой момент времени на него оказывает "сжимающее" действие поле электрического заряда, который расположен выше плоскости АС на верхней половине сферы и ниже плоскости АС – на второй электрон. Этот(называемый далее "эффективный") заряд для одной половины поверхности составляет

$$e_{эф.} = \frac{e}{2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{e \cdot 4\pi Rr}{4\pi R^2} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{r_1}{R_1}\right) = \frac{1}{2} \cdot 0{,}9075e$$

Расстояние между одним из электронов гелиевого остова и элементарным поверхностным зарядом $e\,ds$ на поверхности внешней оболочки не остаётся постоянным при обиходе по поверхности полусферы, а изменяется в пределах от $R\text{-}r$ до $R \cdot \cos\arcsin\frac{r_1}{R_1}$

Среднее расстояние $R_{ср.}$ составляет

$$R_{ср} = \frac{R - r + R \cdot 0{,}9957}{2} = 3{,}8065a_0$$

Вектор силы взаимодействия между электроном гелиевого остова и единичным зарядом поверхности внешней оболочки направлен вдоль их соединяющей. Однако сжимающее действие на внутреннюю оболочку оказывает лишь составляющая вдоль вертикального диаметра, т.е. $f \sin\theta$. На элементарном уровне показано, что среднее значение синусоидальной величины за полупериод равно $2/\pi$

Таким образом,

$$F_2 = 2\frac{0{,}5e_{эф}{}^2}{4\pi\varepsilon_0 R_{ср}^2} \cdot \frac{2}{\pi} : 2\pi = 0{,}2505\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a_0^2}$$

Здесь добавочное 2π привносится при обходе вдоль поверхности сферы параллельно горизонтальной плоскости.

До присоединения третьего электрона на электроны гелиевого остова действует сила со стороны ядра, равная

$$F_1 = 43{,}9\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a_0^2}$$

Сумму этих сил приравниваем силе экв., действующей на внутренние электроны в атоме лития

$$(43{,}9 + 0{,}25051) \cdot \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a_0^2} = \frac{6e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

Решая это уравнение относительно r, получим

$$r^2 = \frac{6}{44{,}15138} = 0{,}135896;\ r = 0{,}3686408$$

Как видим, радиус внутренней оболочки уменьшается на величину

$\Delta r = (r_1 - r) = 0{,}00105653$

Одновременно с уменьшением радиуса внутренней оболочки увеличивается, в соответствии с законом сохранения количества движения, радиус внешней оболочки. Изменение радиусов электронных оболочек, в соответствии с

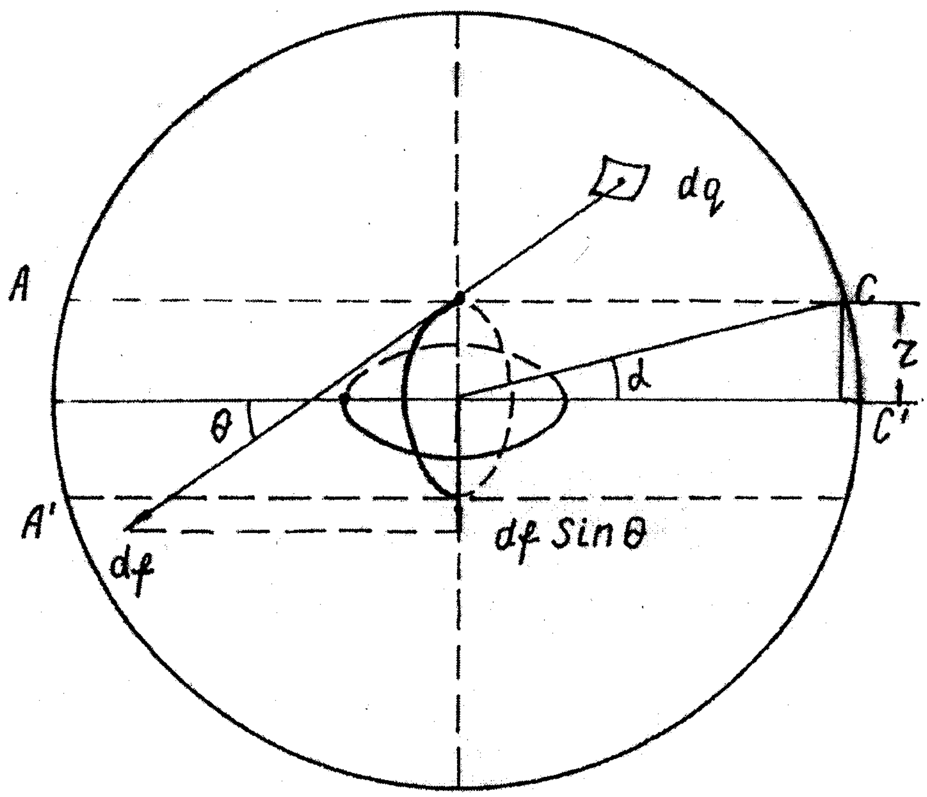

Рис. 3

названным законом физики, происходит обратно пропорционально энергиям их связи с атомом. Следовательно,

$$\Delta R = \Delta r \frac{14,633}{0,25} = 0,135896; r = 0,0616$$

R = 4,0616

С учётом полученных значений r и R находим полную энергию ионизации атома лития:

$$W_0 = \left[2\left(\frac{1}{r}\right)^2 + \left(\frac{2}{R}\right)^2 \right] \cdot 13,59844 = 203,4233$$

Переходим к вычислению энергий отдельных ступеней ионизации атома лития.

В результате взаимодействия электронов внешней и внутренней оболочки радиус гелиевого остова уменьшается. Кинетическая энергия электронов гелиевого остова увеличивается на

$$\Delta W_{1k} = \left[2\left(\frac{1}{r^2}\right)^2 - 2\left(\frac{1}{r_1}\right)^2 \right] \cdot 13,59844 = 1,1383 \text{ э-в}$$

Одновременно уменьшается кинетическая энергия третьего электрона на величину

$$\Delta W_{2k} = \left[\left(\frac{n}{4}\right)^2 - \left(\frac{n}{4,0616}\right)^2 \right] = 0,102338 \text{ э-в}$$

Разность этих величин 1,1495 э-в равна тому количеству дополнительной энергии, которую запасает атом в результате взаимодействия электронов внешней и внутренней оболочек.

Без учёта взаимодействия электронов внешней и внутренней оболочек кинетическая энергия частиц гелиевого остова в атоме лития равна

$$W_{He} = \left(\frac{1}{r_1}\right)^2 \cdot 2 \cdot 13,59844 = 198,9877 \text{ э-в},$$

а взаимодействие электронов оболочек приводит к увеличению кинетической энергии электронов оболочек на величину 1,036 э-в.

При образовании гелиоподобного иона лития путём удаления внешнего электрона удаляемый электрон уносит добавочную энергию 1,036 э-в. Объясняется это тем, что радиус электронных оболочек остающихся электронов увеличивается.

Следовательно, кинетическая энергия электронов гелиоподобного иона лития меньше, чем кинетическая энергия электронов гелиевого остова в атом лития и оказывается равной

W_{He} = 198,9877 – 1,036 = 197,9517 э-в

Если полученную величину вычтем из энергии полной ионизации атома лития, получим

203,4233 – 197,9517 = 5,47157 э-в,

это – потенциал первой ступени ионизации атома лития.

Если же из потенциала ионизации гелиевого остова вычтем потенциал ионизации водородоподобного иона, равного $z^2 \cdot 13,59844$ = 122,3859 э-в, то получим величину энергии второй ступени ионизации атома лития 75,4623 э-в.

Таким образом, мы получили спектр энергий ионизации атома лития:

5,47157 + 75,56583 + 122,3859 = 203,4233 э-в

Экспериментальные данные этих величин составляют [7]

5,39172 + 75,64018 + 122,45429 = 203,48619 э-в

Как видим, предложенный нами аналитический метод расчёта потенциалов ионизации атомов гелия и лития и его ионов даёт хорошие совпадения с данными экспериментов последних лет.

Литература

1. Фейнман Р. и др. Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1967. Т.9. С.210.
2. Гейзенберг В. УФН. 102. Вып.2. 1970. С.291.
3. Очаров И. Н. Преобразования Дарбу и точно решаемые потенциалы уравнений Шрёдингера. Автореф. дисс… канд. физ-мат. наук. Томск, 1996. С. 1.
4. Дж. Орир. Популярная физика. М.: Мир, 1964. С.334-335.
5. Парселл Э. Электричество и магнетизм (Берклеевский курс физики). М.:Наука, 1971. С.304.
6. Слэтер Дж. Электронная структура молекул. М.: Мир, 1965. С.47-52
7. CRC. Hanbook of Chemistry and Physics CRC Press, London. 1994.

Е.А. Дмитриева

Развитие экологических знаний старшеклассников в разделе общей биологии

Статья является продолжением размышлений о развитии знаний старшеклассников по основам экологии (Ярославский педагогический вестник.1999. № 2.)