

A. V. Starovoytov

ABOUT MULTIDIMENSIONAL ANALOG OF ALGORITHM OF COOLEY–TUKEY

In this article, recurring sequences of orthogonal basis in n -dimensional case has being applied for express of formulas of the n -dimensional fast Fourier transformation, which using $\frac{2^n - 1}{2^n} N^n \log_2 N$ complex multiplication and $nN^n \log_2 N$ complex addition, where $N = 2^s$ – number of counting on one of the axis.

Keywords: space of signals, orthogonal basis sequence, multidimensional discrete Fourier transform.

© Старовойтов А. В., 2010

УДК 539.21:537.86

С. С. Аплеснин, А. И. Москвин

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ, ИНДУЦИРУЕМЫЙ ОРБИТАЛЬНЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

Исследована взаимосвязь орбитального порядка и температуры образования спонтанного магнитного момента, постоянной решетки, корреляционных функций орбитальных и магнитных моментов между ближайшими соседями в непрерывной модели Потса для ряда параметров электрон-решеточного и спин-решеточного взаимодействия. Найдено изменение диэлектрической проницаемости и орбитальных корреляционных функций во внешнем магнитном поле.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, магнитоэлектрический эффект, электрон-решеточное взаимодействие, орбитальный и спиновый момент.

Исследование мультиферроиков, в которых сосуществует хотя бы два из трех параметров порядка: магнитный, электрический или кристаллографический [1], является актуальной задачей, так как описывает возможность с помощью электрического поля управлять магнитными свойствами материала и, наоборот, осуществлять модуляцию электрических свойств магнитным полем. В перспективе такие материалы могут найти широкое техническое применение в качестве сенсоров, датчиков, устройств записи-считывания информации. Если в спиновой электронике запись информации происходит путем преобразования намагниченности в электрическое напряжение, то в мультиферроиках связь между магнитной и электрической подсистемами проявляется через магнитоэлектрический эффект [2; 3].

Твердые растворы $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ можно отнести к классу мультиферроиков [4]. В области температур $T = 230$ К обнаружена корреляция между упругой, магнитной и электрической подсистемами. Это подтверждается следующими фактами: найдено изменение угла наклона постоянной решетки, сдвиг пика поглощения рамановской моды, зависимость от предыстории температурного поведения намагниченности и сопротивления при «отжиге» в магнитном поле, нелинейной зависимостью вольт-амперной характеристики в магнитном поле, и наличие максимума в изменении диэлектрической проницаемости во внешнем магнитном поле от температуры [5]. На взаимодействие между электрической, магнитной и уп-

ругой подсистем при температурах $T = 120$ К указывает также образование ферромагнитного порядка, максимум по температуре относительного изменения диэлектрической проницаемости, измеренной во внешнем магнитном поле и в отсутствие поля [6], аномалия коэффициента теплового расширения решетки.

Предполагается, что замещение ионов марганца кобальтом приводит к перераспределению электронной плотности между e_g - и t_{2g} -состояниями. Конкуренция кулоновского взаимодействия между электронами, расположенными на одной орбитали и между орбиталями, совместно с изменением интегралов перескока приводит к упорядочению электронов на определенных орбиталях и к орбитальному магнетизму. В результате перераспределения электронной плотности меняется упругая энергия и под действием электрон-фононного взаимодействия индуцируются связанные моды колебаний ионов.

Цель работы состоит в установлении взаимосвязи между магнитной, электрической и упругой подсистемами и определении тенденций изменения параметров решетки, величины корреляционных функций орбитальных и спиновых моментов в зависимости от параметра электрон-решеточного и спин-фононного взаимодействия.

Модель взаимосвязи электронной и упругой подсистем. Для интерпретации полученных результатов в твердом растворе $\text{Co}_x\text{Mn}_{1-x}\text{S}$ [5; 6] необходимо рассмотреть взаимосвязь электронной и кристаллической струк-

тур. Ион кобальта содержит на два электрона больше в t_{2g} -оболочке, чем ион марганца. В этом случае перескоки между соседними узлами и разными орбиталями совершаются без изменения кулоновского взаимодействия электронов. Кроме того, увеличивается кинетическая энергия электронов вследствие образования узкой мини-зоны в окрестности уровня Ферми, сформированной в результате перескока электронов по ближайшим ионам марганца.

Для пары ионов марганца с наполовину заполненными орбиталями интеграл перескока электронов через анион серы можно оценить по формуле $t_{\alpha\beta}^x = E_{x,\alpha} E_{x,\beta} / [(\varepsilon_p - \varepsilon_d) + U]$, где $E_{x,\alpha}$ – интегралы перекрытия p-орбиталей серы и t_{2g} -орбиталей марганца, имеющих величину $E_{x,\beta} = 1,1 \text{ eV}$; $\varepsilon_p - \varepsilon_d = 1,5 \text{ eV}$ – величина зарядовой щели; $U = 4 \text{ eV}$. Для двух электронов на одном из пяти d-уровней ионов марганца в окружении ионов серы интеграл перекрытия равен нулю $E_{x,\alpha} = 0$ в силу принципа Паули, и при поперечных колебаниях ионов серы возможно слабое перекрытие электронных волновых функций ионов марганца с шириной мини-зоны $W = 2zt = 0,5 - 0,8 \text{ eV}$. Таким образом, транспортные свойства связаны с перескоком дырки по e_g -орбиталям и с движением электронов по t_{2g} -состояниям. Тип носителей соответствует решеточным поляронам, т. е. движение электронов по решетке индуцирует связанные поперечные и продольные колебания ионов серы и реализуется по одной из подзон t_{2g} -зоны, обладающей орбитальным магнитным моментом, а в e_g -зоне движение носителей тока непосредственно связано с типом магнитной структуры. В результате индуцируется разная заселенность d_{xy} -, d_{xz} -, d_{yz} -орбиталей и образуется орбитально-зарядовое упорядочение, сопровождающееся упорядочением орбитальных угловых моментов.

Гамильтониан в феноменологическом представлении для двух орбиталей, обозначим их через x, y , и двух узлов можно записать в виде

$$\begin{aligned} H = & -J_1(n_{1x} - n_{1y})(n_{2x} - n_{2y})(1-c) - \\ & -g(n_{1x} + n_{2x})(1-c)x - g(n_{1y} + n_{2y})(1-c)y + \\ & + \frac{1}{2}k(x^2 + y^2) - b(x^3 + y^3) - h(n_{1x} + n_{2x} - \\ & - n_{1y} - n_{2y})(1-c) - J_2(n_{1ix} - n_{1iy})(n_{2ix} - n_{2iy})c - \\ & - KM_1M_2 - g_s(x+y)M_1M_2 - \lambda(1-c)(n_{1x} - n_{1y}) \times \\ & \times M_1 - \lambda(1-c)(n_{2x} - n_{2y})M_2 - h(M_1 + M_2) - \\ & - h(n_{1ix} - n_{1iy} + n_{2ix} - n_{2iy})c - \\ & - c\lambda(n_{1ix} - n_{1iy})M_1 - \lambda(n_{2ix} - n_{2iy})M_2c, \end{aligned}$$

где $n_{1,2ix}, n_{1,2iy}$ – электронная плотность на орбиталях d_{xz} -, d_{yz} -ионов марганца, окружающих ион кобальта, концентрация которого равна c , и на ионах марганца в матрице с концентрацией $(1-c)$; J_1 и J_2 – обменные взаимодействия между орбитальными магнитными моментами Mn–Mn и Co–Mn; g – параметр электрон-решеточного взаимодействия; x, y – смещения ионов в направлениях, соответствующих сторонам квадрата; k, b – упругие константы; h – магнитное поле; a – постоянная решетки; $K < 0$ – обменное взаимодействие между магнитными

моментами M_1 и M_2 ; g_s – константа спин-решеточного взаимодействия; λ – параметр спин-орбитальной связи. При взаимодействии орбитальных и спиновых моментов возникают члены более высокого порядка (L_1L_2) и (M_1M_2), но для t_{2g} -электронов они существенно меньше спин-орбитального взаимодействия.

В рамках такого гамильтониана мы попытаемся ответить на несколько вопросов. Как влияет концентрация кластеров Mn–Co–Mn и эффективное орбитальное взаимодействие на температуру образования спонтанного магнитного момента. Каким образом будет меняться параметр решетки при орбитально-зарядовом упорядочении, при магнитном упорядочении? К каким изменениям в температурном поведении орбитальных корреляционных функций (соответственно перераспределение заряда) приводит внешнее магнитное поле?

Электронную плотность на t_{2g} -орбиталях ионов марганца в матрице оценим из величины спинового момента на узле $S = 4,4 m_B$ для MnS, т. е. $n_{1,2} \sim 0,1$, а электронная плотность в кластере Mn–Co может достигать величины $n_{1,2i} \sim 0,5$.

Термодинамические характеристики, корреляционную функцию между ближайшими соседями для орбитальных $\langle L_1 L_2 \rangle$, $L = n_{1x} - n_{1y}$ и магнитных $\langle M_1 M_2 \rangle$ моментов, среднюю величину смещения по осям $OX \langle x \rangle$ и $OY \langle y \rangle$ вычислим в непрерывной модели Потса, где соответствующие величины меняются в интервалах $0 < n_{1,2xy} < 0,1$ и $0 < n_{1,2ix} < 0,5$, $0 < x, y < 1$, $-1 < M_{1,2} < 1$.

Термодинамические характеристики модели. Коррелятор магнитных моментов в области температуры перехода из магнитоупорядоченной фазы в парамагнитную уменьшается в два-три раза и имеет точку перегиба. Поэтому температуру, при которой исчезает дальний ферромагнитный порядок орбитальных моментов, ассоциируем с температурой, при которой наблюдается перегиб в температурной зависимости корреляционных функций $\langle L_1 L_2 \rangle (T)$ и $\langle M_1 M_2 \rangle (T)$. Рассмотрим температурные зависимости корреляторов для ряда концентраций ионов кобальта (рис. 1), где можно выделить две температуры, при которых упорядочиваются орбитальные магнитные моменты ионов марганца при T_c и орбитальные моменты кластеров Mn–Co–Mn при T_{c1} . Типичное концентрационное поведение $T_{c1}(c)$ (рис. 2) для двух параметров обмена J_2/J_1 коррелирует с концентрацией кластеров Mn–Co–Mn в зависимости от концентрации кобальта, вычисленных как $c = zx(1-x)^{z-1}$ (z – число ближайших соседей для ГЦК решетки, $z = 12$). Согласно нашим расчетам, зависимость T_{c1} от величины обмена между орбитальными магнитными моментами в кластере Mn–Co–Mn линейна, где угол наклона зависит от концентрации ионов кобальта и электрон-решеточного взаимодействия, которое сдвигает температуру перехода упорядочения орбиталей в сторону высоких температур в пределах 20% при увеличении $g/J \sim 1$. Экспериментальные результаты (рис. 1, 2) удовлетворительно описываются в модели с орбитальным упорядочением угловых моментов.

Рассмотрим влияние электрон-решеточного и спин-решеточного взаимодействия на деформацию решетки и изменение постоянной решетки с температурой (рис. 3). Даны зависимости величины среднего смещения ионов

от температуры для ряда параметров электрон-решеточного и спин-решеточного взаимодействий с учетом ангармонизма колебаний решетки (рис. 3, а). Взаимодействие электронов с учетом решеточных степеней свободы приводит к увеличению расстояния между электронами, т. е. к росту постоянной решетки. Так, смещение прямо пропорционально константе электрон-фононного взаимодействия $\langle x \rangle = gn/k$ в системах с сильными электронными корреляциями, когда кулоновское взаимодействие превышает ширину зоны, в пренебрежении ангармонизмом колебаний. С ростом величины электрон-решеточного взаимодействия наблюдается изменение величины наклона при некоторой температуре, которая сдвигается в область высоких температур с ростом параметра g .

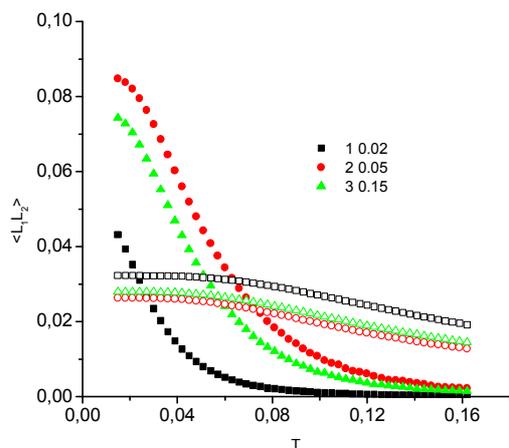


Рис. 1. Корреляционная функция магнитных орбитальных $\langle L_1 L_2 \rangle$ моментов в матрице из ионов марганца (светлые символы) и в кластере Mn–Co–Mn (темные символы) в зависимости от температуры для $J_1 = 10, J_2 = 6, g = 6, k = 20, b = 3, K = -0,35, g_s = 0,1, \lambda = 0,1, x = 0,02$ (1), 0,05 (2), 0,15 (3)

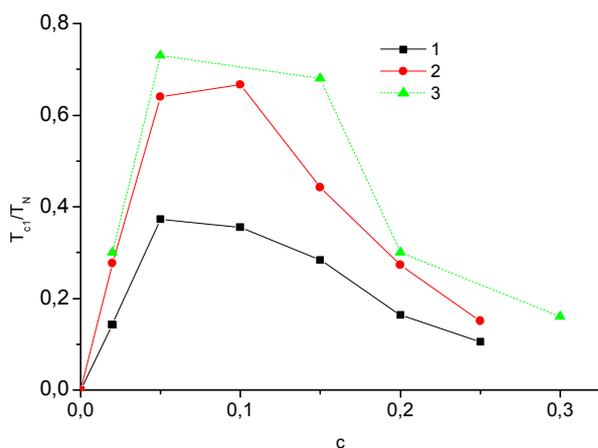


Рис. 2. Температура формирования орбитального магнитного момента в кластере Mn–Co–Mn, нормированная на температуру Нееля, для ряда параметров $J_2 = 5$ (1), 8 (2), $J_1 = 10, g = 6, k = 20, b = 3, K = -0,35, g_s = 0,1, \lambda = 0$; эксперимент (3) от концентрации кобальта

Обменное взаимодействие между локализованными спинами имеет экспоненциальную зависимость от рас-

стояния, в результате сжатия решетки плотность перекрытия волновых функций электронов растет и возрастает энергия обмена. Увеличение спин-решеточной связи приводит к смене знака средней величины смещения ионов (рис. 3, б). В результате конкуренции электрон-решеточных и спин-решеточных взаимодействий решетка сжимается. Изменение наклона зависимости $d\langle x \rangle/dT$ наблюдается в области перехода в магнитоупорядоченное состояние.

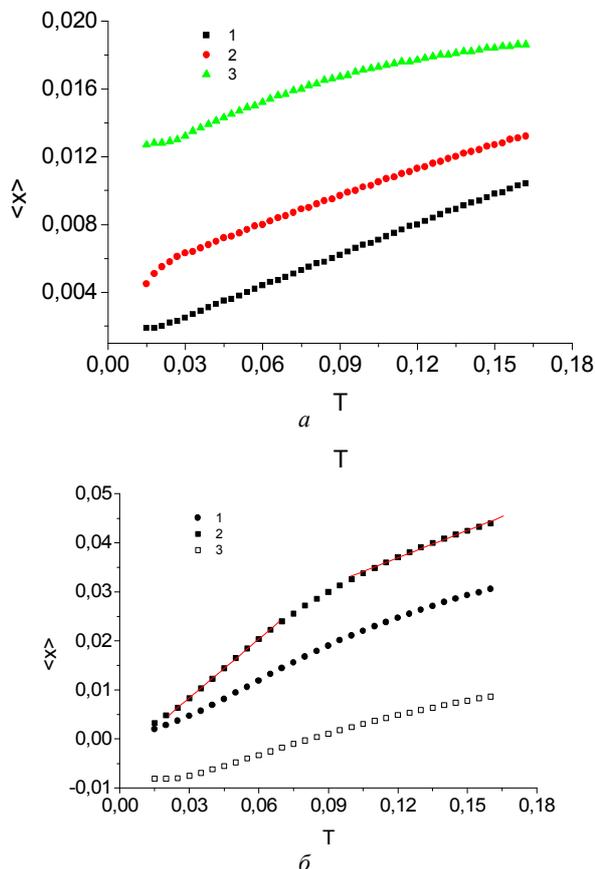


Рис. 3. Величина среднего смещения иона $\langle x \rangle$ от температуры для ряда параметров электрон-фононного взаимодействия $g = 2$ (1), 5 (2), 8 (3) с $b = 1, J_2 = 6, J_1 = 10, k = 20, K = -0,35, g_s = 0,1, \lambda = 0, x = 0,15$ (а) и для двух параметров спин-фононного взаимодействия $g_s = 0,1, x = 0,02$ (1), $x = 0,05$ (2), $g_s = 0,2, x = 0,05$ (3) с $J_1 = 10, J_2 = 6, g = 6, k = 20, b = 3, K = -0,35, \lambda = 0,1$ (б)

Флуктуации спиновых магнитных моментов в двух подрешетках ассиметричны при наличии спин-орбитального взаимодействия, в результате индуцируется суммарный магнитный момент ($M_1 + M_2$) с максимумом при температуре Нееля. Магнитный момент и постоянные решетки зависят от температуры (рис. 4). Взаимодействие орбитальных и спиновых моментов аналогично действию внешнего магнитного поля $h_{ef} = \lambda \langle L \rangle$, когда меняется величина намагниченности одной из подрешеток (рис. 4, а). Перераспределение электронной плотности на d_{xz} -, d_{zy} -орбиталях является причиной возникновения тетрагонального искажения (рис. 4, б).

Изменение электронной плотности на e_g - и t_{2g} -состояниях индуцирует электронную поляризацию иона, которая определяется поляризуемостью атома $\alpha = \alpha_n + 2b_n$

$[M_J^2 - 1/3 J(J+1)]$, где α_n, b_n – постоянные; J – полный момент атома; M_J – проекция момента на выделенное направление. Диэлектрическая проницаемость связана с поляризуемостью $\epsilon = 1 + 4\pi N\alpha$, и изменение диэлектрической проницаемости во внешних магнитных и электрических полях определяется как $\Delta\epsilon \sim \Delta\alpha \sim \Delta M_J^2 \sim \Delta \langle L_1 L_2 \rangle$. Перестройка орбитальной структуры магнитным или электрическим полями проявится в изменении корреляционных функций (рис. 5). Первый максимум в области низких температур обусловлен изменением орбитальной корреляционной функции в кластере Mn–Co, а второй связан с ростом орбитального порядка в марганцевой системе. Это качественно объясняет наличие двух максимумов в магнитоэлектрическом эффекте. Аналогичное поведение наблюдается во внешнем электрическом поле в результате изменения электронной плотности на орбиталях вследствие зависимости потенциальной энергии электрона от расстояния во внешнем однородном электрическом поле. Существенный вклад в диэлектрическую проницаемость дает также ян–теллеровское смещение ионов, которое не учитывается в данной модели.

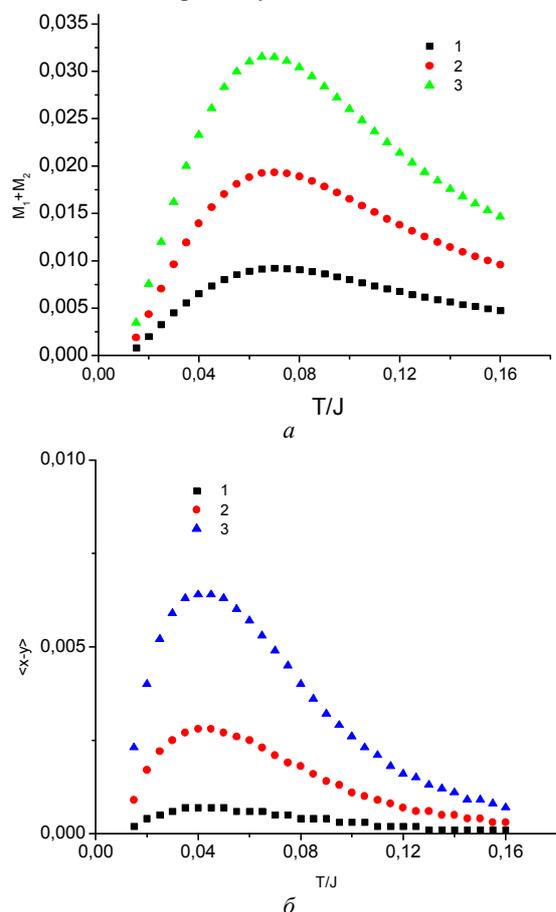


Рис. 4. Общая намагниченность спиновых моментов $\langle M_1 + M_2 \rangle$ (а) и величина тетрагонального искажения решетки $\langle x - y \rangle$ (б) в зависимости от температуры для ряда параметров спин-орбитального взаимодействия $\lambda = 0,1$ (1), 0,2 (2), 0,3 (3) с $J_1 = 10, J_2 = 5, g = 6, k = 20, b = 3, K = -0,35, g_s = 0,1, x = 0,05$

Конкуренция кулоновского взаимодействия между электронами, расположенными на одной орбитали и между орбиталями, совместно с изменением интегралов перескока приводит к упорядочению электронов на определенных орбиталях и к орбитальному магнетизму. Электрон-фононное взаимодействие приводит к расширению решетки, а спин-фононное – к сжатию решетки. В результате конкуренции орбитального и спинового упорядочения вычислена величина тетрагонального искажения в зависимости от температуры. Оценена величина магнитоэлектрического эффекта.

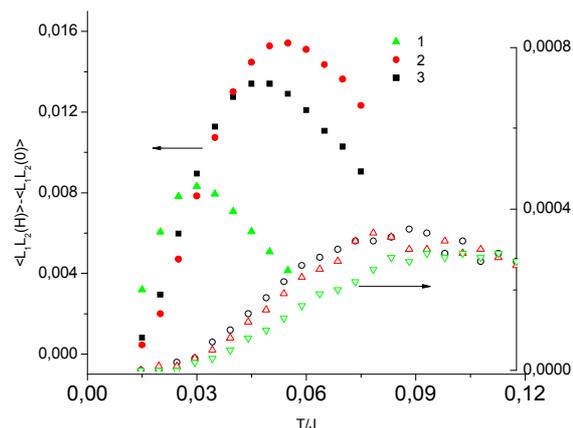


Рис. 5. Разность корреляционных функций орбитальных магнитных моментов для кластеров Mn–Co–Mn (левая шкала) и для ионов марганца (правая шкала), вычисленных в магнитном поле и без поля, от температуры для $J_1 = 10, J_2 = 5, g = 6, k = 20, b = 3, K = -0,35, g_s = 0,1, \lambda = 0,1, x = 0,02$ (1), 0,05 (2), 0,15 (3)

Библиографические ссылки

1. Epitaxial BiFeO₃ Multiferroic Thin Film Heterostructures / J. Wang, J. B. Neaton, H. Zheng et al. // Science. 2003. 209. P. 1719–1728.
2. Звездин А. К., Пятаков А. Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект // УФН. 2004. Т. 174. С. 465–468.
3. Смирнов А. И, Хлюстикова И. Н. Магнитоэлектрические эффекты и эффект Штарка в антиферромагнетике // УФН. 1995. Т. 165. С. 1215–1219.
4. Транспортные свойства и ферромагнетизм сульфидных соединений Co_xMn_{1-x}S / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // ЖЭТФ. 2008. Т. 133. С. 875–883.
5. Магнитоэлектрический эффект в Co_{1-x}Mn_xS / С. С. Аплеснин, О. Н. Бандурина, О. Б. Романова и др. // Вестник СибГАУ. Вып. 1(22). Красноярск, 2009. С. 41–45.
6. Спин-стекольные эффекты в твердых растворах Co_{1-x}Mn_xS / С. С. Аплеснин, Л. И. Рябинкина, О. Б. Романова и др. // Известия РАН. Серия Физическая. 2009. Т. 73. № 7. С. 1021–1023.

S. S. Aplesnin, A. I. Moskvina

MAGNETOELECTRIC EFFECT INDUCED BY ORBITAL ORDERING OF ELECTRONS

Relationship between orbital order and formation of spontaneous magnetic moment, lattice constant, correlation function of orbital and spin moments between nearest neighbors have been investigated in terms of continuous Potts model for a set of parameters of electron-lattice and spin-lattice interactions. Change in dielectric permittivity and in orbital correlation functions in external magnetic field has been found.

Keywords: dielectric permittivity, magnetoelectric effect, electron-lattice interaction, orbital and spinmoment.

© Аплеснин С. С., Москвина А. И., 2010

УДК 62-506.1

М. В. Карасева

ГЕНЕРАЦИЯ АССОЦИАТИВНОГО ПОЛЯ ЛЕКСИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

Рассматривается модификация адаптивно-обучающего алгоритма, которая позволяет применять методику обучения на основе лексически связанных компонентов, учитывает неоднородность скоростей забывания и способствует целостности восприятия базисных компонентов информационно-терминологического обеспечения.

Ключевые слова: генерация ассоциативного поля, информационно-терминологический базис, мультилингвистическая адаптивно-обучающая технология.

Задача изучения иностранных языков может быть поделена на множество подзадач, а именно: изучение грамматики, изучение лексики, отработка произношения, формирование навыков говорения, аудирования, чтения и письма, и, наконец, развитие речевой и коммуникативной компетенции обучаемого. Решение всех этих подзадач с помощью компьютерных технологий в своей целостности и формирует компьютерную обучающую среду как интегрированное средство изучения языка, о которой было сказано в [1].

В данной работе рассматривается задача изучения терминологической лексики иностранных языков, а точнее, задача интенсивного накопления профессионально ориентированного вокабуляра обучаемого, что является очень важным для специалистов, работающих с иностранной литературой, и студентов, слушающих лекции на иностранных языках. Один из путей решения задачи изучения профессионально ориентированной иностранной лексики – применение мультилингвистической адаптивно-обучающей технологии, ядром которой является алгоритм обучения, работающий на основе адаптивной модели обучаемого, учитывающий индивидуальные факторы процессов запоминания и забывания каждого конкретного обучаемого.

Человеческую память можно представить в виде огромного количества ячеек. Обозначим множество ячеек для слов родного языка

$$K_N = \{k_1, \dots, k_N\}, \quad (1)$$

где каждая из ячеек содержит слово.

При изучении первого иностранного языка (например, английского) вследствие пополнения словарного запаса в памяти генерируется новое множество ячеек для запомненных слов английского языка

$$K_E = \{k_1, \dots, k_E\}. \quad (2)$$

В дальнейшем у обучаемого при актуализации i -го слова на одном из языков возникают ассоциации с его значением на другом языке:

$$A_i^{NE}, \quad i = 1, \dots, E. \quad (3)$$

Ассоциация – связь между психическими элементами, возникшая в результате опыта и обуславливающая при актуализации одного элемента связи проявление и другого [2]. Степень их связи может быть различной в зависимости от скорости восприятия информации и забывания, времени забывания слова после его последнего заучивания и индивидуальных особенностей памяти обучаемого.

При изучении второго иностранного языка (например, немецкого) через определенный промежуток времени в памяти возникают все новые ячейки для запомненных немецких слов, множество которых обозначим

$$K_G = \{k_1, \dots, k_G\}. \quad (4)$$

Множество K_G частично перекрывает множество запомненных английских слов K_E , так как число элементов множества K_E в зависимости от времени после последнего заучивания уменьшается. Выражая объем памяти как функцию времени, зависимость можно проследить: даже отлично выученные иностранные слова забываются с