

ИМИДЖЕВЫЕ ТИПОЛОГИИ В ПРОЦЕССЕ ПОЗНАНИЯ

IMIGE TYPOLOGIES IN COGNITION PROCESS

Владимир Васильевич Гудков **Vladimir Vasilievich Gudkov**

доктор физико-математических
наук, профессор

gudkov@imp.uran.ru

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

Ural Federal University named after the
first President of Russia B. N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia

Аннотация. На примере элементарных ячеек кристаллических решеток, поверхностей Ферми металлов и адиабатических потенциалов примесей замещения в кристаллах рассматривается построение типологий, основанных на визуальных образах.

Ключевые слова: систематика, типология, процесс познания, визуальный образ, элементарная ячейка, поверхность Ферми, адиабатический потенциал.

Abstract. Construction of typologies based on visual images is discussed using elementary cells of crystals, Fermi surfaces of metals and adiabatic potential energies of substitution impurities as the examples.

Keywords: virtualization museum, a virtual tour, youth, education, potential.

В «Большой российской энциклопедии» относительно понятия «типология» сказано следующее:

«**Типология** (от гр. τύπος — отпечаток, образец, форма и ...логия): 1) метод научного познания, в основе которого лежит расчленение систем объектов и их группировка с помощью типа, т. е. обобщенной, идеализированной модели; 2) результат типологического описания и сопоставления.

Проблемы Т. возникают во всех науках, которые имеют дело с крайне разнородными по своему составу множествами объектов (как правило, дискретных) и решают задачу упорядоченного описания и объяснения этих множеств. Т. может основываться на понятии типа как основной логической единицы расчленения либо использовать иные логические формы. Это, во-первых, классификация ... отраслей

и видов экономической деятельности, разделение множества объектов социально-экономической информации на подмножества по их сходству или различию в соответствии с принятыми методами, обеспечивающими систематизацию отраслей и видов деятельности по определенным свойствам, характеристикам или параметрам, цель которой сводится к построению иерархической системы классов и их подклассов на основе некоторых признаков, как присущих самим объектам (естественная классификация), так и не свойственных им; во-вторых, систематика, предполагающая максимально полную и расчлененную классификацию данного множества объектов с фиксированной иерархией единиц описания; в-третьих, таксономия, в рамках которой специально исследуются принципы рациональной классификации и систематики. По способу построения различают эмпириче-

скую и теоретическую типологию. В основе первой лежит количественная обработка опытных данных, фиксация устойчивых признаков сходства и различия, находимых индуктивным путем, систематизация и интерпретация полученного материала. Теоретическая Т. опирается на понимание объекта как системы и предполагает построение его идеальной модели, а также фиксацию принципов таксономического описания (гомологическое сходство в систематике животных, принцип симметрии в физике элементарных частиц и т. д.)» [1].

Таким образом, с точки зрения процесса познания построение типологии означает описание некоторой системы объектов с помощью систематики, в рамках которой все структурные элементы будут разделены на классы, различающиеся по некоторым фундаментальным свойствам и/или признакам. В данной работе мы рассмотрим роль типологий в естественных науках, т. е. будем обсуждать теоретические типологии и покажем, что среди этих типологий можно выделить такие, систематизация которых основана на образах — чаще всего трехмерных объектах, внешне хорошо различающихся, а структурные элементы системы (элементы нижнего уровня иерархии) группируются в соответствии с этой систематикой так, что качественные характеристики отражены с помощью упомянутого выше образа (относящегося к более высокому уровню иерархии), а внутригрупповые отличия являются лишь количественными, т. е. сводятся к масштабированию. Естественным было бы назвать такую систематику образной типологией, но в русском языке термин «образное» имеет оттенок переносного смысла и используется обычно при замене одного понятия на другое, более яркое или понятное. В нашем случае «образное» следует понимать буквально, т. е. как «визуальное». В связи с этим, чтобы избежать неоднозначности трактовки понятия, типологию, основанную на образах, мы будем называть имиджевой (от англ. *image* — образ).

Характерными примерами имиджевых типологий, на наш взгляд, являются типологии элементарных ячеек кристаллов [3] и ферми-поверхностей металлов и вырожденных полупроводников [2, 5].

Элементарная ячейка представляет собой часть кристаллической решетки, переносы ко-

торой в трех измерениях позволяют построить всю кристаллическую решетку [3], и полностью характеризуется шестью числами: тремя длинами ребер и тремя углами. Само понятие элементарной ячейки было введено в первую очередь для описания симметричных свойств кристаллов, которые по этим признакам разделены на кристаллографические классы, называемые сингониями. Всего существует шесть сингоний (триклинная, моноклинная, ромбическая, тетрагональная, гексагональная и кубическая), по которым распределены 14 типов ячеек, называемых ячейками Браве. На рис. 1 приведены примеры элементарных ячеек и модели соответствующих кристаллов, атомы в которых представлены в виде сфер. Очевидно, что глядя на визуальное представление элементарной ячейки, значительно проще представить симметричные свойства кристаллов, чем формальное математическое описание в виде набора чисел ($a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$), хотя последнее и является абсолютно полным.

Следующей имиджевой типологией, рассматриваемой нами, является типология поверхностей Ферми. Названная в честь итальянского физика Энрико Ферми, нобелевского лауреата 1938 г., ферми-поверхность представляет собой поверхность равной энергии (энергии Ферми), заданную в пространстве волновых векторов. Само существование такой поверхности связано с тем, что в металлах и вырожденных полупроводниках имеются носители заряда (электроны и дырки), представляющие систему многих квазичастиц, подчиняющихся статистике Ферми-Дирака, слабо связанную с решеткой. При нулевой температуре все состояния ниже энергии Ферми E_F заняты, а выше E_F — свободны. При конечных температурах электроны и дырки, обладающие энергией, близкой к E_F , перемещаются в пространстве и тем самым

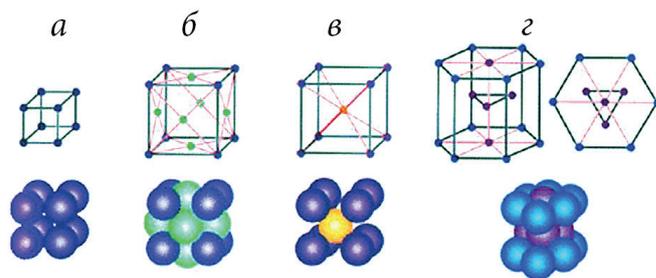


Рис. 1. Элементарные ячейки кристаллов:
а – в – кубические; г – гексагональная

определяют кинетические свойства кристалла (проводимость, электропроводность, магнитосопротивление). Динамические свойства квазичастиц в кристалле отличаются от свойств свободных частиц тем, что закон дисперсии (зависимость энергии от импульса) не является квадратичным: наличие периодической кристаллической решетки кристалла проявляется в силу их волновых свойств, возникают запрещенные зоны E_g и сама квадратичная зависимость искажается вблизи границ зон Бриллюэна (рис. 2).

Как уже было отмечено выше, симметричные свойства кристаллов (точечные и трансляционные) описываются с помощью решеток Браве. Зоны Бриллюэна являются элементарными ячейками обратной решетки. Как и решеток Браве, существует 14 типов обратных решеток.

Можно было бы ожидать, что и поверхностей Ферми окажется приблизительно столько же (это будет число того же порядка), однако заполнение энергетических состояний зависит от того, сколько носителей заряда в единице объема в кристалле. Как следствие — уровень Ферми может проходить в тех или иных зонах Бриллюэна, формируя довольно сложные и иногда многосвязные поверхности. Тем не менее, некоторые металлические кристаллы имеют похожие ферми-поверхности. Как правило, они располагаются в одной и той же колонке таблицы Менделеева. Кристаллы с похожими поверхностями будут иметь близкие транспортные свойства, т. е. в данном случае определенные физические

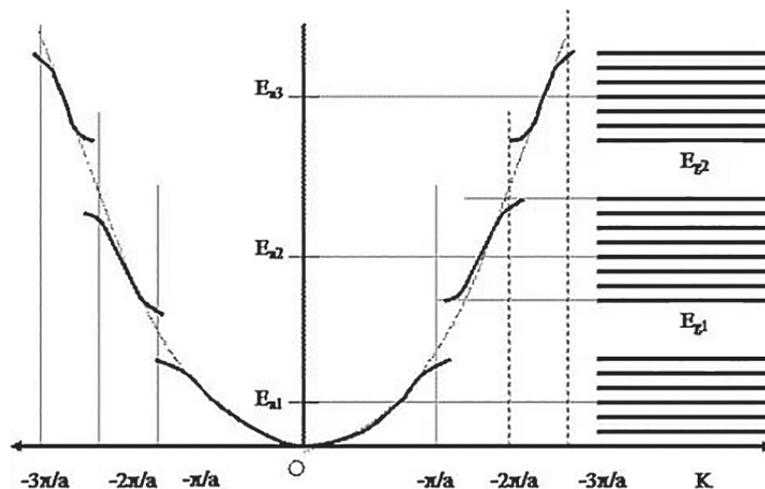


Рис. 2. Закон дисперсии электронов в кристалле

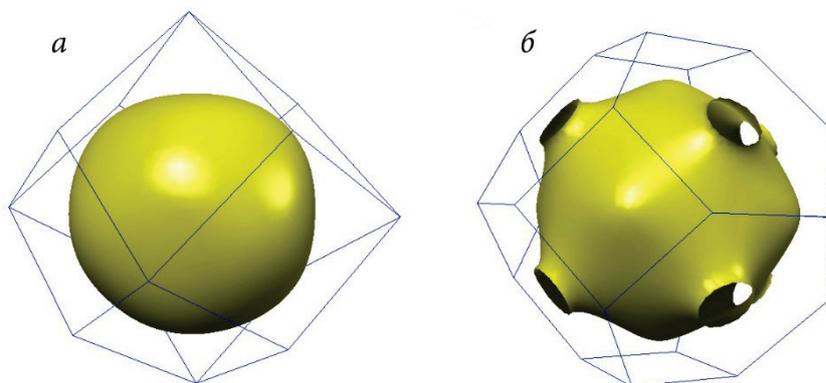


Рис. 3. Поверхности Ферми: а — Li, Na, K, Rb; б — Cu, Ag, Au

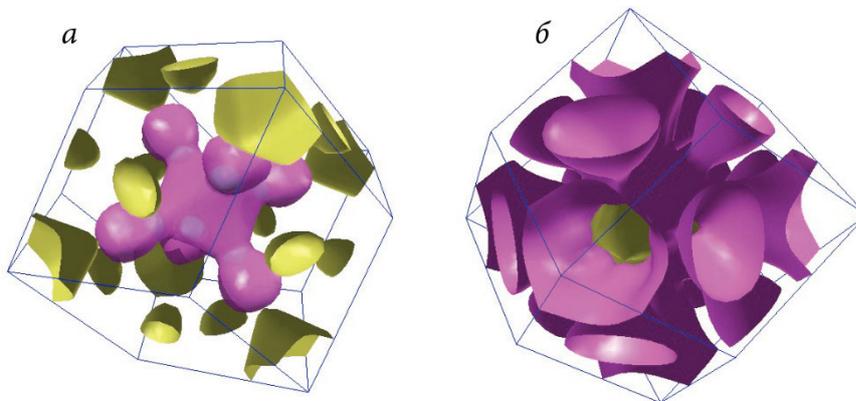


Рис. 4. Поверхности Ферми: а — Cr, Mo, W; б — V, Nb, Ta

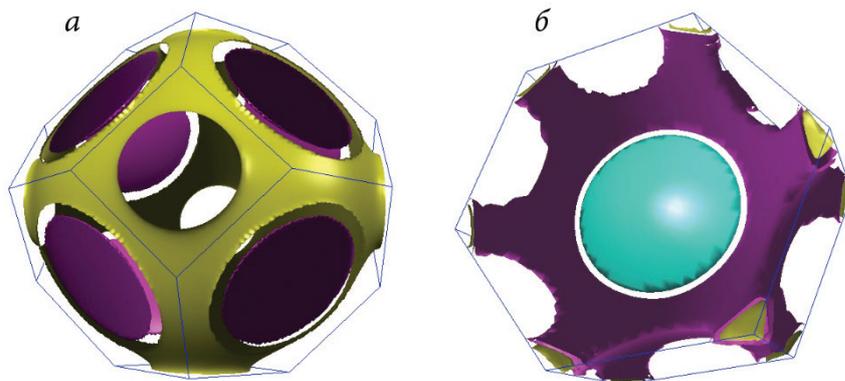


Рис. 5. Поверхности Ферми Zn, Cd:
а — в кубической; б — гексагональной решетке

ские свойства связываются с трехмерными образцами, представляя собой имиджевую типологию. Примеры ферми поверхностей некоторых металлов приведены на рис. 3–5. Отметим, что один и тот же химический элемент может кристаллизоваться в разных решетках. Такой полиморфизм проявляется и в фермиологии: разным кристаллическим фазам будут соответствовать разные поверхности Ферми, несмотря на то, что химический элемент один и тот же (см. рис. 5). Методика конструкции поверхностей Ферми основана на теоретических расчетах и экспериментальных данных, в первую очередь, по эффекту де Гааза — ван Альфена и Шубникова — де Гааза [5]. Эта область физики твердого тела интенсивно исследовалась в середине XX в. и в настоящее время для всех металлов и собственных полупроводников интересующие нас параметры известны.

Еще одной имиджевой типологией можно считать типологию адиабатического потенциала примеси замещения с орбитально вырожденными состояниями в кристалле. Адиабатический потенциал представляет собой потенциальную энергию комплекса, состоящего из примесного атома и его ближайшего окружения. Он связывает электронные и колебательные (вибронные) степени свободы и является функцией симметричных координат (коллективных координат, описывающих пространственные искажения комплекса, обладающие элементами симметрии): полносимметричной (Q_a), двух тетрагональных (Q_g, Q_e) и трех тригональных (Q_ξ, Q_η, Q_ζ) [4].

Мы рассмотрим построение типологии адиабатического потенциала на примере связывания двух- и трехкратно вырожденных орбитальных состояний с колебаниями тетрагональной симметрии ($E \otimes e$ и $T \otimes e$ задачи эффекта Яна — Теллера, соответственно). Вибронное взаимодействие, как правило, мало, поэтому его можно представить в виде разложения по степеням симметричных координат и ограничиться первыми и квадратичными членами разложения с коэффициентами, называемыми константами вибронной связи. Оговоримся сразу, что в качестве примеров будем рассматривать лишь самые нижние листы адиабатического потенциала, определяющие основное состояние комплекса. В случае $E \otimes e$ задачи энергия комплекса в ли-

нейном и квадратичном приближении имеет вид (см. с. 53 в [5])

$$\varepsilon_{\pm} = \frac{1}{2} K_E \rho^2 \pm |F_E| \rho, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\pm} = \frac{1}{2} K_E \rho^2 \pm \rho \left[F_E^2 + G_E^2 \rho^2 + 2F_E G_E \rho \cos(3\varphi) \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где $\rho = \sqrt{Q_e^2 + Q_g^2}$, $Q_g = \rho \cos \varphi$, $Q_e = \rho \sin \varphi$;

F_E и G_E — линейная и квадратичная константы вибронной связи, соответственно;

K_E — первичная силовая константа, описывающая упругость комплекса без учета вибронного взаимодействия.

Адиабатические потенциалы (для ε_{\pm}), определенные выражениями (1) и (2), изображены на рис. 6. В случае линейного приближения для $E \otimes e$ задачи поверхность адиабатического потенциала $\varepsilon_{\pm} = \varepsilon_{\pm}(Q_e, Q_g)$ получила название «мексиканская шляпа», а учет квадратичного слагаемого приводит к появлению трех минимумов и трех седловых точек на дне его желоба. Методика конструкции адиабатического потенциала на основе выражений (1) – (2) и экспериментальных данных о поглощении ультразвука приведена нами в другой статье [6]. Адиабатический потенциал, изображенный на рис. 7, реализуется в таких кристаллах, как GaAs: Cu²⁺ и ZnSe: Fe²⁺.

При трехкратном орбитальном вырождении глобальные минимумы адиабатического потенциала могут иметь тетрагональную симметрию ($T \otimes e$ задача), тригональную ($T \otimes t_2$ задача), орторомбическую ($T \otimes (e+t_2)$ задача в квадратичном приближении) и тетрагональные и тригональные одновременно ($T \otimes d$ задача). В настоящее время разработана методика для конструкции адиабатического потенциала в случае $T \otimes e$ задачи, когда нижние листы задаются следующими выражениями

$$\varepsilon_k = \frac{1}{2} K_E \rho^2 + \varepsilon_k^v \quad (k = 1, 2, 3), \quad (3)$$

$$\varepsilon_1^v = -F_E Q_g, \quad (4)$$

$$\varepsilon_2^v = F_E \left(\frac{1}{2} Q_g + \frac{\sqrt{3}}{2} Q_e \right), \quad (5)$$

$$\varepsilon_3^v = F_E \left(\frac{1}{2} Q_g - \frac{\sqrt{3}}{2} Q_e \right). \quad (6)$$

Методика конструкции адиабатического потенциала на основе выражений (3) — (6) так-

же приведена нами в другой работе [7] и реализована на основе экспериментальных данных, полученных в кристаллах ZnSe: Cr²⁺.

Как уже было отмечено, типология поверхностей Ферми была разработана в середине XX в. Подчеркнем, что это результат теоретических и экспериментальных исследований. Что касается создания типологии адиабатических потенциалов, то это вопрос ближайшего будущего. Теоретически эта область разработана достаточно полно, но для создания реальной типологии необходимы экспериментальные исследования. Начало им положено [7], но основное еще впереди.

В заключение — несколько слов о том, почему имиджевые типологии можно считать самостоятельным видом типологий и об их особенностях. Если обсуждать теоретические типологии, то создание имиджевых типологий состоит в замене формул на визуальные образы, которые легче воспринимаются. Здесь надо подчеркнуть, что в силу эволюционных особенностей наш мозг хорошо приспособлен к обработке визуальной информации, поскольку она составляет 80 % от всей, поступающей от наших органов чувств. Безусловно, имиджевые типологии не могут заменить математическое описание, но в значительной мере облегчают процесс познания. И еще одно замечание. Рассмотренные в данной статье имиджевые типологии имеют явно выраженную взаимосвязь. Основным признаком кристаллов — определенный порядок пространственного расположения атомов. Это свойство описывается первой типологией — типологией элементарных ячеек. Учет носителей заряда, способных перемещаться по кристаллу, приводит к возникновению второй типологии — типологии поверхностей Ферми. Учет колебательных степеней свободы атомов, образующих кристалл, приводит к третьей — типологии адиабатическо-

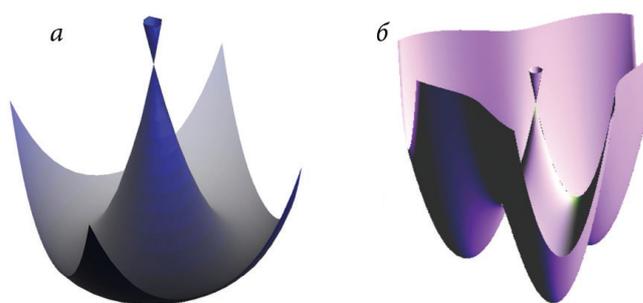


Рис. 6. Адиабатический потенциал в случае $E \otimes e$ задачи: *a* — в линейном приближении; *б* — *в* — квадратичном приближении

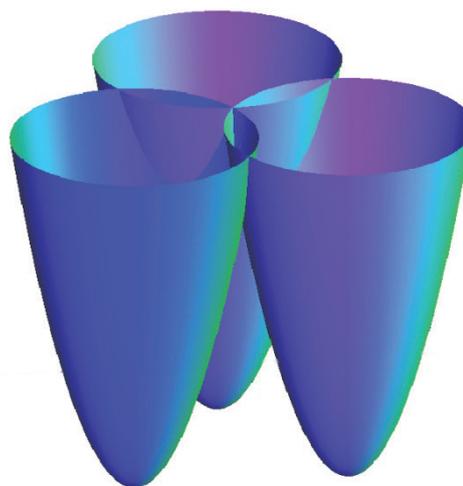


Рис. 7. Адиабатический потенциал в случае $E \otimes e$ задачи в линейном приближении

го потенциала. С точки зрения зонной теории кристаллов, вторая типология имеет отношение к зоне проводимости, а третья — к валентной зоне. Таким образом, вторая относится к проводникам, а третья — к диэлектрикам.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18–02–00332а) и постановления № 211 Правительства РФ (контракт № 02.A03.21.0006, ключевой центр превосходства «Радиационные и ядерные технологии»).

Список литературы

1. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bigenc.ru/philosophy/text/4192667>.
2. Гайдуков Ю. П. Топология поверхностей Ферми металлов / Ю. П. Гайдуков // Успехи физических наук. 1970. Т. 100, вып. 3. С. 449–466.
3. Энциклопедический словарь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/es/66375/>.

4. Bersuker I. B. *The Jahn – Teller Effect* / I. B. Bersuker. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 616 p.
5. Cracknell A. P. *The Fermi Surface* / A. P. Cracknell, S. Wong. Oxford: Clarendon Press, 1973. 565 p.
6. Gudkov V. V. *Experimental Evaluation of the Jahn – Teller Effect Parameters by Means of Ultrasonic Measurements. Application to Impurity Centers in Crystals* / V. V. Gudkov, I. B. Bersuker // *Vibronic Interactions and the Jahn – Teller Effect. Theory and Applications* / M. Atanasov [et al.]. Heidelberg: Springer, 2012. P. 143–161.
7. *Ultrasonic evaluation of the Jahn – Teller effect parameters. Application to ZnSe: Cr²⁺* / V. V. Gudkov [et al.] // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2011. Vol. 23. P. 115401.

УДК 378.16:004.3/4

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ КАФЕДРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

INFORMATION SYSTEMS IN EDUCATIONAL PROCESS OF DEPARTMENT OF THE EXPERIMENTAL PHYSICS

Максим Дмитриевич Петренко **Maxim Dmitrievich Petrenko**

аспирант
md.petrenko@urfu.ru

Владимир Юрьевич Иванов **Vladimir Yurievich Ivanov**

кандидат физико-математических наук,
заведующий кафедрой экспериментальной
физики
v.ivanov@urfu.ru

Максим Николаевич Сарычев **Maxim Nikolaevich Sarychev**

аспирант
mak.sarychev@yandex.ru

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

Ural Federal university, Russia, Ekaterinburg

Аннотация. Рассмотрено аппаратное и программное обеспечение, применяемое в образовательном процессе по информационным технологиям на кафедре экспериментальной физики.

Abstract. The hardware and software systems used in educational process on information technologies on department of the experimental physics are described in the paper.

Ключевые слова: сетевые технологии, программное обеспечение, аппаратное обеспечение, практические занятия.

Keywords: network technologies, software, hardware, practical training.