

УДК 535.56

UDC 535.56

ОПИСАНИЕ ШТАРКОВСКОЙ СТРУКТУРЫ МУЛЬТИПЛЕТОВ ИОНА Eu^{3+} В $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$ И $\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$ В ПРИБЛИЖЕНИИ АНОМАЛЬНО СИЛЬНОГО КОНФИГУРАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

THE DESCRIPTION OF THE STARK STRUCTURE OF Eu^{3+} ION IN $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$ AND $\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$ CRYSTAL SYSTEMS IN THE APPROXIMATION OF ANOMALOUSLY STRONG CONFIGURATION INTERACTION

Л. А. Фомичева,

*кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры высшей математики
БГУИР;*

А. А. Корниенко,

*доктор физико-математических наук,
профессор кафедры автоматизации
технологических процессов и производств
ВГТУ;*

Е. Б. Дунина,

*кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры высшей математики и
информационных технологий
ВГТУ*

L. Fomicheva,

*Candidate of Physics and Mathematics,
Associate Professor of the Department
of Higher Mathematics, BSUIR;*

A. Kornienko,

*Doctor of Physics and Mathematics,
Professor of the Department of Automation
of Technological Processes and Executions,
VSTU;*

E. Dunina,

*Candidate of Physics and Mathematics,
Associate Professor of the Department of
Higher Mathematics and Informational
Technologies, VSTU*

Поступила в редакцию 29.04.16.

Received in 29.04.16.

Выполнено описание штарковской структуры мультиплетов иона Eu^{3+} в $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$ и $\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$ с помощью модифицированного гамильтониана кристаллического поля, полученного в приближении аномально сильного конфигурационного взаимодействия. На основе выполненных расчетов определены параметры ковалентности.

Ключевые слова: конфигурационное взаимодействие, кристаллическое поле, гамильтониан, штарковская структура, лантаноид, эльпасолит, ион Eu^{3+} , параметры ковалентности.

The description of the Stark structure of the multiplets of ion Eu^{3+} in $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$ and $\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$ with the help of modified crystal field Hamiltonian was obtained in the approximation of anomalously strong configurational interaction. The covalence parameters are determined on the basis of the executed calculations.

Keywords: configuration interaction, crystal field, Hamiltonian, Stark structure, lanthanide, elpasolite, Eu^{3+} ion, covalence parameter.

Введение. Кристаллы структурного типа эльпасолита применяют как активные среды для лазерных кристаллов [1–12]. Особый интерес представляют эльпасолиты, легированные редкоземельными элементами. Важной особенностью таких соединений является тот факт, что примесные трехвалентные редкоземельные ионы могут находиться в кубическом кристаллическом окружении без необходимости зарядовой компенсации. Вследствие кубической O_h локальной симметрии редкоземельных ионов в этих

кристаллах гамильтониан кристаллического поля содержит всего лишь два параметра B_0^4 и B_0^6 , которые однозначно определяются по методу наименьших квадратов из экспериментальных данных. Таким образом, кубические эльпасолиты являются удобными системами для тестирования различных вариантов теории кристаллического поля.

Информация о структуре и оптических свойствах образуемых комплексов является важной, так как позволяет вести целенаправленное выращивание кристаллов

с заранее заданными оптическими характеристиками, поэтому теоретическое исследование подобных систем является актуальной задачей.

В некоторых работах [9; 10] описание кристаллического поля выполнено на основе гамильтониана спин-коррелированного кристаллического поля. В работах [5–8] описание выполнено с учетом конфигурационного взаимодействия, в некоторых случаях учтен эффект от переноса заряда, в связи с чем добавлен параметр B_0^4 ($4f^2p$) [7]. Но при этом по-прежнему остаются мультиплеты, описание которых не является удовлетворительным, а также остается невыясненной роль влияния конфигураций противоположной четности и эффектов ковалентности. Для устранения этого пробела в данной работе предлагается использовать модифицированную теорию кристаллического поля [13–15], в которой учтено аномально сильное влияние процессов с переносом заряда. В качестве объектов исследования были выбраны кристаллические системы Rb_2NaEuF_6 и $Cs_2KYF_6:Eu^{3+}$. Применение теории, в которой учитывается влияние возбужденных конфигураций, позволило значительно уменьшить среднеквадратичное отклонение теоретических значений энергии от экспериментальных. В результате расчетов определены параметры ковалентности (параметры распределения электронной плотности), которые обычно получают в экспериментах по двойному электронно-ядерному резонансу.

Теоретические основы. Для описания штарковской структуры мультиплетов обычно используют гамильтониан кристаллического поля, полученный в приближении слабого конфигурационного взаимодействия [16]:

$$H_{cf} = \sum_{k,q} B_q^k C_q^k, \quad (1)$$

где $C_q^k = \sum_{i=1}^N c_q^k(i)$ – сферический тензорный оператор, B_q^k – параметры кристаллического поля.

Более детально влияние возбужденных конфигураций можно учесть в при-

ближении промежуточного конфигурационного взаимодействия [17]:

$$H_{cf} = \sum_{k,q} \left[B_q^k + (E_J + E_{J'} - 2E_f^0) \tilde{G}_q^k \right] C_q^k, \quad (2)$$

где E_J , $E_{J'}$ – энергия мультиплетов; E_f^0 – центр тяжести энергии $4f^N$ конфигурации;

\tilde{G}_q^k – параметры, обусловленные межконфигурационным взаимодействием.

Иногда влияние возбужденных конфигураций настолько сильное, что для адекватного описания штарковской структуры необходимо использовать гамильтониан кристаллического поля в приближении сильного конфигурационного взаимодействия [17]:

$$H_{cf} = \sum_{k,q} \left[B_q^k + \left(\frac{\Delta^2}{\Delta - E_J} + \frac{\Delta^2}{\Delta - E_{J'}} \right) \tilde{G}_q^k \right] C_q^k, \quad (3)$$

где Δ – энергия возбужденной конфигурации.

Следует заметить, что формула (3) справедлива, если определяющий вклад в параметры межконфигурационного вза-

имодействия \tilde{G}_q^k дает лишь одна возбужденная конфигурация или несколько возбужденных конфигураций с близкими значениями энергии Δ . Если же возбужденные конфигурации имеют существенно разные энергии, то эффективный гамильтониан имеет более сложный вид [13–15]:

$$H_{cf} = \sum_{k,q} \left\{ B_q^k + \left(\frac{\Delta_d^2}{\Delta_d - E_J} + \frac{\Delta_d^2}{\Delta_d - E_{J'}} \right) \tilde{G}_q^k(d) + \sum_i \left(\frac{\Delta_{ci}^2}{\Delta_{ci} - E_J} + \frac{\Delta_{ci}^2}{\Delta_{ci} - E_{J'}} \right) \tilde{G}_q^k(c) \right\} C_q^k. \quad (4)$$

Обычно определяющий вклад в параметры \tilde{G}_q^k дают конфигурации противоположной четности $4f^{N-1}5d$ и конфигурации с переносом заряда. Но поскольку эльпасолиты обладают кубической симметрией, то слагаемое

$$\left(\frac{\Delta_d^2}{\Delta_d - E_J} + \frac{\Delta_d^2}{\Delta_d - E_{J'}} \right) \tilde{G}_q^k(d),$$

соответствующее конфигурации противоположной четности, равно нулю и в этом

случае необходимо учитывать только вклад от процессов с переносом заряда [17]:

$$\tilde{G}_q^k(c) = \sum_b \tilde{J}^k(b) C_q^{k*}(\Theta_b, \Phi_b), \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{J}^2(b) &\approx \frac{5}{28} [2\gamma_{\sigma f}^2 + 3\gamma_{\pi f}^2], \\ \tilde{J}^4(b) &\approx \frac{3}{14} [3\gamma_{\sigma f}^2 + \gamma_{\pi f}^2], \\ \tilde{J}^6(b) &\approx \frac{13}{28} [2\gamma_{\sigma f}^2 - 3\gamma_{\pi f}^2]. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь γ_{if} ($i = \sigma, \pi$) – параметры ковалентности.

Результаты и их обсуждение. Локальная симметрия иона Eu^{3+} в $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$ и $\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$ кубическая O_h , поэтому гамильтониан кристаллического поля содержит всего два независимых параметра

B_0^4 и B_0^6 . В приближении аномально сильного конфигурационного взаимодействия гамильтониан (4) дополнительно содержит параметры Δ_{ci} , соответствующие энергии конфигурации с переносом заряда, а также в неявном виде содержит параметры ковалентности $\gamma_{\sigma f}$ и $\gamma_{\pi f}$.

Описание штарковской структуры ионов Eu^{3+} во фторидах $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$, $\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$ было выполнено в двух приближениях: в приближении слабого и аномально сильного конфигурационного взаимодействия (таблица 1). При описании штарковской структуры мультиплетов иона Eu^{3+} во фторидах $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$ и $\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$ с помощью модифицированного гамильтониана (4) удается достичь практического полного совпадения теории с экспериментом (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение экспериментальных [18] и вычисленных штарковских уровней в приближении слабого (1) и аномально сильного конфигурационного взаимодействия (4) для кристаллических систем $\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$ и $\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$. Все величины даны в см^{-1}

$\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$				$\text{Cs}_2\text{KYF}_6:\text{Eu}^{3+}$			
$2S+1L_J$	E_{exp} , [18]	$E_{\text{exp}} - E_{\text{calc1}}$, (1)	$E_{\text{exp}} - E_{\text{calc2}}$, (4)	$2S+1L_J$	E_{exp} , [18]	$E_{\text{exp}} - E_{\text{calc1}}$, (1)	$E_{\text{exp}} - E_{\text{calc2}}$, (4)
7F_0				7F_0			
1	0	0.0	0.0	1	0	0.0	0.0
7F_1				7F_1			
2	336	0.0	0.0	2	341	0.0	0.0
7F_2				7F_2			
3	820	0.0	0.0	3	806	13.4	-0.2
4	1086	0.0	0.0	4	1071	-13.4	0.2
7F_3				7F_3			
5	-	(1827.2)	(1754.9)	5	1780	-3.0	0.0
6	1949	0.0	0.0	6	1948	-13.1	0.0
7	2018	0.0	0.0	7	2012	3.0	0.0
7F_4				7F_4			
8	2685	0.0	0.0	8	2672	2.3	0.0
9	-	(3061.5)	(3034.5)	9	-	(3031.9)	(3039.5)
10	-	(3086.0)	(3099.9)	10	3136	-2.3	0.0

$\text{Rb}_2\text{NaEuF}_6$				$\text{Cs}_2\text{KYF}_6: \text{Eu}^{3+}$			
$2S+1L_J$	E_{exp}' [18]	$E_{\text{exp}} - E_{\text{calc1}}'$ (1)	$E_{\text{exp}} - E_{\text{calc2}}$ (4)	$2S+1L_J$	E_{exp}' [18]	$E_{\text{exp}} - E_{\text{calc1}}$ (1)	$E_{\text{exp}} - E_{\text{calc2}}$ (4)
11	-	(3107.4)	(3126.3)	11	-	(3215.0)	(3197.7)
7F_5				7F_5			
12	-	(3849.7)	(3694.6)	12	-	(3820.9)	(3791.2)
13	-	(3868.6)	(3857.0)	13	-	(3852.7)	(3829.7)
14	-	(3904.4)	(3868.1)	14	-	(3853.2)	(3851.4)
15	-	(4234.6)	(4241.7)	15	-	(4210.5)	(4175.8)
7F_6				7F_6			
16	-	(4915.7)	(4812.7)	16	-	(4873.8)	(4817.4)
17	-	(4951.9)	(4876.3)	17	-	(4913.3)	(4869.0)
18	-	(5028.4)	(5004.6)	18	-	(4988.4)	(4972.6)
19	-	(5324.5)	(5551.2)	19	-	(5422.0)	(5491.8)
20	-	(5362.2)	(5621.1)	20	-	(5458.4)	(5555.8)
21	-	(5395.0)	(5683.7)	21	-	(5492.6)	(5614.1)
5D_0				5D_0			
22	17257	0.0	0.0	22	17245	0.0	0.0
5D_1				5D_1			
23	19006	0.0	0.0	23	18997	0.0	0.0
5D_2				5D_2			
24	-	(21482.1)	(21473.9)	24	21377	-42.3	-0.0
25	-	(21563.9)	(21575.2)	25	21560	42.3	0.0
5D_3				5D_3			
26	-	(24385.7)	(24375.8)	26	-	(24312.2)	(22098.1)
27	-	(24406.2)	(24407.6)	27	-	(24344.9)	(23074.4)
28	-	(24465.1)	(24496.4)	28	-	(24404.2)	(24316.5)
5L_6				5L_6			
29	-	(26746.0)	(26097.2)	29	-	(26663.0)	(24325.5)
30	-	(26841.6)	(26239.4)	30	-	(26779.2)	(24413.8)
31	-	(26964.3)	(26830.4)	31	-	(26913.4)	(24810.8)
32	-	(28269.2)	(28659.8)	32	-	(27346.0)	(28859.8)
33	-	(27485.3)	(27991.5)	33	-	(27546.9)	(31649.3)
34	-	(27538.2)	(28264.1)	34	-	(27604.2)	(32363.0)
σ		0.005	0.003	σ		19.401	0.142

Следует отметить, что при описании Rb_2NaEuF_6 среднеквадратичное отклонение практически равно нулю при расчетах, выполненных как по стандартной теории в приближении слабого конфигурационного взаимодействия, так и с помощью модифицированной теории (таблица 1). К сожалению, малое количество экспериментальных данных по системам Rb_2NaEuF_6 и $Cs_2KYF_6:Eu^{3+}$ не позволяет получить однозначные значения параметров гамильтониана кристаллического

поля (4), но теоретические расчеты позволяют получить значения энергии тех уровней, которые не были получены экспериментально. Рассматриваемая теория (4) применима к описанию подобных систем, поскольку при таком наличии экспериментальных данных дает практически стопроцентное согласие с экспериментом и, что очень важно, позволяет получить оценочные значения параметров гамильтониана кристаллического поля (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры гамильтониана кристаллического поля, вычисленные в приближении слабого (1) и аномально сильного (4) конфигурационного взаимодействия

	Rb_2NaEuF_6	$Cs_2KYF_6:Eu^{3+}$
	(1)	(1)
$B_0^4, \text{см}^{-1}$	2324	2807
$B_0^6, \text{см}^{-1}$	419	266
	(4)	(4)
$B_0^4, \text{см}^{-1}$	2319	2275
$B_0^6, \text{см}^{-1}$	418	215
$\gamma_{\sigma f} \cdot 10^4$	-409	-413
$\gamma_{\pi f} \cdot 10^4$	203	204
$\Delta_{c1}, \text{см}^{-1}$	2737	3154
$\Delta_{c2}, \text{см}^{-1}$	5129	5158
$\Delta_{c3}, \text{см}^{-1}$	26 810	27 257

Заключение. Рассматриваемая теория ранее позволила получить хорошие результаты для эльпасолитов, активированных другими f-элементами: Tm^{3+} [19], Pr^{3+} [20], U^{4+} [21]. Результаты расчетов, приведенные в данной статье, позволяют утверждать, что с помощью гамильтониана (4) удается получить хорошее согласие между вычисленной штарковской структурой мультиплетов и экспериментальной для иона Eu^{3+} в эльпасолитах. Кроме того,

для всех названных кристаллических систем на основе описания штарковской структуры без каких-либо дополнительных экспериментальных данных были получены параметры электронной плотности (параметры ковалентности). Таким образом, рассматриваемая теория кристаллического поля может быть успешно применена для изучения оптических свойств эльпасолитов, активированных f-элементами.

ЛИТЕРАТУРА

1. The lanthanide crystal field in cubic $\text{Cs}_2\text{NaLnCl}_6$ elpasolites/ T. R. Faulkner [et al.] // Mol. Phys. – 1980. – Vol. 40, № 6. – P. 1481–1488.
2. Tanner, P. A. Excitation and emission spectra of $\text{Cs}_2\text{NaLnCl}_6$ crystals using synchrotron radiation / P. A. Tanner, Ch.-K. Duana, B.-M. Cheng // Spectroscopy Letters. – 2010. – Vol. 43, № 5. – P. 431–445.
3. Reid, M. F. Comparison of $4f^2$ energy parameters for Pr^{3+} in cubic elpasolite crystals / M. F. Reid, F. S. Richardson. P. A. Tanner // Mol. Phys. – 1987. – Vol. 60, № 4. – P. 881–886.
4. Luminescence Spectra of Am^{3+} in $\text{Cs}_2\text{NaLuBr}_6:\text{Am}^{3+}$ Bromoelpasolite/ Yu. A. Barbanel' [et al.] // Radiochemistry. – 2001. – Vol. 43, № 1. – P. 30–33.
5. $4f$ - $5d$ transitions of Pr^{3+} in elpasolite lattices / P. A. Tanner [et al.] // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 67, № 11. – P. 115102.
6. Evidence for strong interaction between the $5f^2$ and $5f^17p^1$ configurations of U^{4+} in the octahedral sites of Cs_2UBr_6 and Cs_2ZrBr_6 / M. D. Faucher [et al.] // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 53, № 15. – P. 9501–9504.
7. Tanner, P. A. Electronic spectra and crystal field analysis of TmF_6^{3-} / P. A. Tanner, M. D. Faucher / Chem. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 445, № 4–6. – P. 183–187.
8. Faucher, M. D. Electronic Spectra and Configuration Interaction of Tm^{3+} in TmCl_6^{3-} / M. D. Faucher, P. A. Tanner, C. S. K. Mak // J. Phys. Chem. A. – 2004. – Vol. 108, № 24. – P. 5278–5287.
9. Thorne, J. R. G. Evidence for a spin-correlated crystal field – two-photon spectroscopy of thulium III in the elpasolite $\text{Cs}_2\text{NaYCl}_6:\text{Tm}$ / J. R. G. Thorne, Q. Zeng, R. G. Denning // J. Phys. Condens. Mat. – 2001. – Vol. 13, № 33. – P. 7403–7420.
10. Thorne, J. R. G. Spin-correlated crystal field analysis of lanthanide elpasolites / J. R. G. Thorne, C. S. McCaw, R. G. Denning // Chem. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 319, № 3–4. – P. 185–190.
11. Duan, Mei Ling. Theoretical Study of Energy-Level Splitting of $\text{Cs}_2\text{NaPrCl}_6$ Crystal / Mei Ling Duan, Jin Hong Li, Xiao Feng Yang // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 268–270. – P. 11–14.
12. Duan, Mei Ling. Energy-Level Splitting of $\text{Cs}_2\text{NaYCl}_6$ Crystal Doped with Praseodymium / Mei Ling Duan, Jin Hong Li, Xiao Feng Yang // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 634–638. – P. 11–14.
13. Фомичева, Л. А. Моделирование оптических свойств иона U^{4+} в кристалле ZrSiO_4 / Л. А. Фомичева, А. А. Корниенко, Е. Б. Дунина // ЖТФ. – 2007. – Т. 77, вып. 10. – С. 6–10.
14. Dunina, E. B. Modified theory of f-f transition intensities and crystal field for systems with anomalously strong configuration interaction / E. B. Dunina, A. A. Kornienko, L. A. Fomicheva // Cent. Eur. J. Phys. – 2008. – Vol. 6, № 3. – P. 407–414.
15. A. A. Kornienko, E. B. Dunina, L. A. Fomicheva. Determination of odd symmetry crystal field parameters from optical spectra. Optics and Spectroscopy, 2014, Vol. 116, № 5. – P. 683–690.
16. Wybourne, B. G. Spectroscopic Properties of Rare Earths / B. G. Wybourne. – New York: J. Wiley and Sons Inc, 1965. – 236 p.
17. Корниенко, А. А. Теория спектров редкоземельных ионов в кристаллах. Курс лекций / А. А. Корниенко. – Витебск: Издательство УО «ВГУ им. П. М. Машерова», 2003. – 128 с.

REFERENCES

1. The lanthanide crystal field in cubic $\text{Cs}_2\text{NaLnCl}_6$ elpasolites/ T. R. Faulkner [et al.] // Mol. Phys. – 1980. – Vol. 40, № 6. – P. 1481–1488.
2. Tanner, P. A. Excitation and emission spectra of $\text{Cs}_2\text{NaLnCl}_6$ crystals using synchrotron radiation / P. A. Tanner, Ch.-K. Duana, B.-M. Cheng // Spectroscopy Letters. – 2010. – Vol. 43, № 5. – P. 431–445.
3. Reid, M. F. Comparison of $4f^2$ energy parameters for Pr^{3+} in cubic elpasolite crystals / M. F. Reid, F. S. Richardson. P. A. Tanner // Mol. Phys. – 1987. – Vol. 60, № 4. – P. 881–886.
4. Luminescence Spectra of Am^{3+} in $\text{Cs}_2\text{NaLuBr}_6:\text{Am}^{3+}$ Bromoelpasolite/ Yu. A. Barbanel' [et al.] // Radiochemistry. – 2001. – Vol. 43, № 1. – P. 30–33.
5. $4f$ - $5d$ transitions of Pr^{3+} in elpasolite lattices / P. A. Tanner [et al.] // Phys. Rev. B. – 2003. – Vol. 67, № 11. – P. 115102.
6. Evidence for strong interaction between the $5f^2$ and $5f^17p^1$ configurations of U^{4+} in the octahedral sites of Cs_2UBr_6 and Cs_2ZrBr_6 / M. D. Faucher [et al.] // Phys. Rev. B. – 1996. – Vol. 53, № 15. – P. 9501–9504.
7. Tanner, P. A. Electronic spectra and crystal field analysis of TmF_6^{3-} / P. A. Tanner, M. D. Faucher / Chem. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 445, № 4–6. – P. 183–187.
8. Faucher, M. D. Electronic Spectra and Configuration Interaction of Tm^{3+} in TmCl_6^{3-} / M. D. Faucher, P. A. Tanner, C. S. K. Mak // J. Phys. Chem. A. – 2004. – Vol. 108, № 24. – P. 5278–5287.
9. Thorne, J. R. G. Evidence for a spin-correlated crystal field – two-photon spectroscopy of thulium III in the elpasolite $\text{Cs}_2\text{NaYCl}_6:\text{Tm}$ / J. R. G. Thorne, Q. Zeng, R. G. Denning // J. Phys. Condens. Mat. – 2001. – Vol. 13, № 33. – P. 7403–7420.
10. Thorne, J. R. G. Spin-correlated crystal field analysis of lanthanide elpasolites / J. R. G. Thorne, C. S. McCaw, R. G. Denning // Chem. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 319, № 3–4. – P. 185–190.
11. Duan, Mei Ling. Theoretical Study of Energy-Level Splitting of $\text{Cs}_2\text{NaPrCl}_6$ Crystal / Mei Ling Duan, Jin Hong Li, Xiao Feng Yang // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 268–270. – P. 11–14.
12. Duan, Mei Ling. Energy-Level Splitting of $\text{Cs}_2\text{NaYCl}_6$ Crystal Doped with Praseodymium / Mei Ling Duan, Jin Hong Li, Xiao Feng Yang // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 634–638. – P. 11–14.
13. Fomicheva, L. A. Modelirovaniye opticheskikh svoystv iona U^{4+} v kristalle ZrSiO_4 / L. A. Fomicheva, A. A. Kornienko, Ye. B. Dunina // ZhTF. – 2007. – Т. 77, вып. 10. – С. 6–10.
14. Dunina, E. B. Modified theory of f-f transition intensities and crystal field for systems with anomalously strong configuration interaction / E. B. Dunina, A. A. Kornienko, L. A. Fomicheva // Cent. Eur. J. Phys. – 2008. – Vol. 6, № 3. – P. 407–414.
15. A. A. Kornienko, E. B. Dunina, L. A. Fomicheva. Determination of odd symmetry crystal field parameters from optical spectra. Optics and Spectroscopy, 2014, Vol. 116, № 5. – P. 683–690.
16. Wybourne, B. G. Spectroscopic Properties of Rare Earths / B. G. Wybourne. – New York: J. Wiley and Sons Inc, 1965. – 236 p.
17. Kornienko, A. A. Teoriya spektrov redkozemelnykh ionov v kristallakh. Kurs lektsiy / A. A. Kornienko. – Vitsebsk: Izdatelstvo UO "VGU im. P. M. Masherova", 2003. – 128 s.

18. P. A. Tanner, V. V. Ravi Kanth Kumar, C. K. Jayasankar, M. F. Reid // Journal of Alloys and Compounds, 215 (1994). – P. 349–370.
19. Фомичева, Л. А. Влияние конфигурационного взаимодействия на расщепление мультиплетов в молекулярных комплексах TmF_6^{3-} и $TmCl_6^{3-}$ / Л. А. Фомичева, А. А. Корниенко, Е. Б. Дунина // ЖПС. – 2010. – Т. 77, № 2. – С. 173–178.
20. Fomicheva, L. Description of Stark structure of the elpasolites $Cs_2NaPrCl_6$, Cs_2NaYCl_6 and Cs_2NaYBr_6 / L. Fomicheva, E. Dunina, A. Kornienko // Universal Journal of Physics and Application. – 2013. Vol. 1, № 2. – P. 98–104.
21. Дунина, Е. Б. Сильное конфигурационное взаимодействие в молекулярных комплексах UBr_6^{2-} и UCl_6^{2-} / Е. Б. Дунина, Л. А. Фомичева, А. А. Корниенко // ЖПС. – 2012. – Т. 79, № 4. – С. 521–526.
18. P. A. Tanner, V. V. Ravi Kanth Kumar, C. K. Jayasankar, M. F. Reid // Journal of Alloys and Compounds, 215 (1994). – P. 349–370.
19. Fomicheva, L. A. Vliyaniye konfiguratsionnogo vzaimodeystviya na rasshchepleniye multipletov v molekulyarnykh kompleksakh TmF_6^{3-} i $TmCl_6^{3-}$ / L. A. Fomicheva, A. A. Kornienko, Ye. B. Dunina // ZhPS. – 2010. – Т. 77, № 2. – S. 173–178.
20. Fomicheva, L. Description of Stark structure of the elpasolites $Cs_2NaPrCl_6$, Cs_2NaYCl_6 and Cs_2NaYBr_6 / L. Fomicheva, E. Dunina, A. Kornienko // Universal Journal of Physics and Application. – 2013. Vol. 1, № 2. – P. 98–104.
21. Dunina, Ye. B. Silnoye konfiguratsionnoye vzaimodeystviye v molekulyarnykh kompleksakh UBr_6^{2-} i UCl_6^{2-} / Ye. B. Dunina, L. A. Fomicheva, A. A. Kornienko // ZhPS. – 2012. – Т. 79, № 4. – S. 521–526.

Дана збірочий БАН