

## НЕОРГАНІЧНА ХІМІЯ

УДК 544.228

Т.Р. Татарчук, У.Л. Куш

### Теорія кристалічного поля для комплексних сполук із центральними атомами d-первнів у плоскоквадратичному та тетраедричному оточеннях лігандів

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна*

Описано застосування теорії кристалічного поля до комплексних сполук d-первнів у тетраедричному та плоскоквадратичному оточенні лігандів. Поле лігандів викликає розщеплення d-орбіталей, яке характеризується енергією розщеплення. У залежності від електронної структури центрального йону і положення ліганду в спектрохімічному ряду показано розрахунок зменшення енергії у результаті утворення комплексу, який називають енергією стабілізації кристалічним полем. Наведено розподіл електронів на орбіталях комплексоутворювачів з різними електронними конфігураціями (від  $d^1$  до  $d^{10}$ ), приклади комплексоутворювачів, значення енергій орбіталей та енергій стабілізації кристалічним полем для високоспінових та низькоспінових тетраедричних комплексів.

**Ключові слова:** кристалічне поле, ліганд, енергія розщеплення, центральний атом, d-орбіталь, тетраедричний комплекс, плоскоквадратичний комплекс, низькоспіновий комплекс, високоспіновий комплекс.

T.R. Tatarchuk, U.L. Kush

### Theory of Crystal Field for Complex Compounds with the d-Elements Central Atoms Surrounded by Square-Planar and Tetrahedral Ligands

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine*

The crystal field theory as applied to complex compounds of d-elements surrounded by tetrahedral and square-planar ligands was described. Ligand field causes the splitting of d-orbitals, which is characterized by the energy splitting  $\Delta_f$ . It shows the calculation of gains power as a result of complex formation, called the crystal field stabilization energy (CFSE) depending on the electronic structure of the central ion and the ligand position in spectrochemical series. It shows the distribution of electrons in orbitals of  $e$  and  $t_2$  complex ions with different electronic configurations (from  $d^1$  to  $d^{10}$ ), examples values of energy orbitals and energy of crystal field stabilization for high-spin and low-spin tetrahedral complexes.

**Key words:** crystal field, ligand, splitting energy, central atom, d-orbital, tetrahedral complex, square-planar complex, low-spin complexes, high-spin complexes.

*Стаття постуила до редакції 28.08.2015; прийнята до друку 15.09.2015.*

#### Вступ

Координаційне число 4 характерне для великої кількості комплексних неорганічних сполук і реалізується у тетраедричному чи плоскоквадратичному розташуванні лігандів, хоча відомі також

проміжні та деформовані форми комплексів. Тетраедричні та квадратичні чотирикоординовані комплекси займають друге місце за поширеністю після октаедричних комплексів. Тетраедричні комплекси із просторовою групою симетрії ( $T_d$ ) утворюються тоді, коли центральний атом невеликий, а

ліганди – великі (наприклад,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ). Плоскоквадратичні комплекси виникають тоді, коли чотири ліганди оточують центральний атом металу в плоскоквадратичному розташуванні. В цьому випадку вони описуються просторовою групою симетрії  $D_{4h}$ .

У даній статті описується застосування теорії кристалічного поля до комплексних сполук із центральними атомами d-первинів у тетраедричному оточенні лігандів, розглядається зміна енергії п'яти вироджених d-орбіталей в оточенні точкових зарядів лігандів у залежності від значення енергії розщеплення та наводяться значення енергії стабілізації кристалічним полем для низькоспінових та високоспінових тетраедричних комплексів.

## Теоретична частина

У межах теорії кристалічного поля під час розгляду полікоординованих комплексів необхідно враховувати розташування d-орбіталей за енергією (табл. 1) [1].

### I. Плоскоквадратичні комплекси

Йони  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pt}^{2+}$ ,  $\text{Pd}^{2+}$  мають електронну конфігурацію типу  $(t_{2g})^6(e_g)^2$ , яка є симетричною відносно до октаедричного поля лігандів. Але у випадку сильного поля більш стабільною буде конфігурація, коли обидва  $e_g$  електрони переходять на  $d_z^2$  орбіталь, енергія якої нижча порівняно з енергією  $d_{x^2-y^2}$  орбіталі. У результаті утворюється сильно деформована октаедрична структура або повністю втрачається пара лігандів і, як наслідок, утворюється плоскоквадратичний комплекс. Плоскоквадратичний комплекс зручно розглядати як октаедричний, у якого відсутні ліганди, які розташовані вздовж осі z (рис. 1). Прикладами плоскоквадратичних комплексів є:  $\text{CuO}$ ,  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ ,  $[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{2-}$ ,  $\text{K}_2\text{PtCl}_4$  [2, 3].

Як видно із рис. 1, у найбільш енергетично вигідному розташуванні буде орбіталь  $d_z^2$ , яка направлена в напрямі від лігандів, а в найбільш енергетично невигідному положенні буде орбіталь  $d_{x^2-y^2}$ , яка розташована у напрямку до лігандів. Решта три орбіталі матимуть проміжну стійкість залежно від відстані до лігандів.  $d_{yz}$  і  $d_{xz}$  орбіталі більш стійкі, ніж  $d_{xy}$ , так як вони направлені поза площину розташування лігандів. Звідси впливає енергетичне розташування d-орбіталей комплексоутворювача у плоскоквадратичному комплексі (рис. 2) [2, 3].

Таке розміщення d-орбіталей приводить до плоскоквадратичного комплексу конкурентоздатного порівняно з тетраедричним при відповідних умовах, які визначаються розміщенням електронів на орбіталах [2, 3].

Плоскоквадратичні комплекси стерично менш вигідні, ніж тетраедричні комплекси і вони не утворюються при наявності великих лігандів. Якщо

ж ліганди достатньо малі, то замість плоскоквадратичного комплексу часто утворюється октаедричний. Утворюють плоскоквадратичні комплекси йони металів з конфігурацією  $d^8$ , наприклад,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pt}^{2+}$ ,  $\text{Pd}^{2+}$ ,  $\text{Au}^{3+}$ , а також йон  $\text{Co}^{2+}$  з конфігурацією  $d^7$ , який утворює плоскоквадратичні комплекси з бідентатними лігандами.

Умовою стійкості плоскоквадратичних комплексів є наявність невеликих лігандів з сильним полем, які, за рахунок додаткового  $\pi$ -зв'язування, стабілізують всю систему. Наприклад,  $\text{Ni}^{2+}$  з лігандом сильного поля  $\text{CN}^-$ , утворює плоскоквадратичний комплекс, з лігандами поля середньої сили –  $\text{NH}_3$  і  $\text{H}_2\text{O}$  – утворює октаедричний комплекс, а з великими лігандами  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$  – тетраедричний комплекс. Для важких металів стеричні чинники мають менше значення, а ефективна сила поля всіх лігандів є достатньою умовою утворення плоскоквадратичних комплексів. Тому, тетрахлооропаладат(II)-, тетрахлоороплатинат(II)- і тетрахлоороаурат(III)-йони є плоскоквадратичними. Щодо ізомерії, то плоскоквадратичні комплекси з загальною формулою  $\text{MA}_2\text{B}_2$  проявляють цис- та транс-ізомерію (рис. 3).

Дипольні властивості дозволяють легко розрізнити (а часто і розділити) цис- і транс-ізомери, якщо різниця в полярності зв'язків M–A і M–B велика. Для нашого прикладу слід зауважити, що комплекс цис-дихлородіаміноплатина полярний ( $\mu > 0$ ), а транс-ізомер – неполярний ( $\mu = 0$ ).

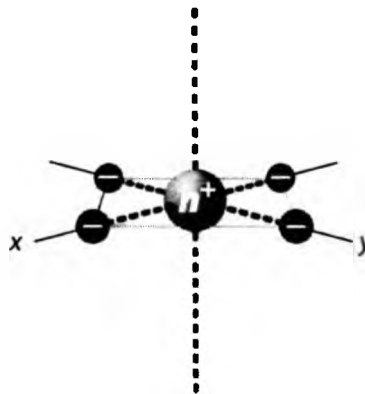


Рис. 1. Просторове зображення плоскоквадратичного комплексу.

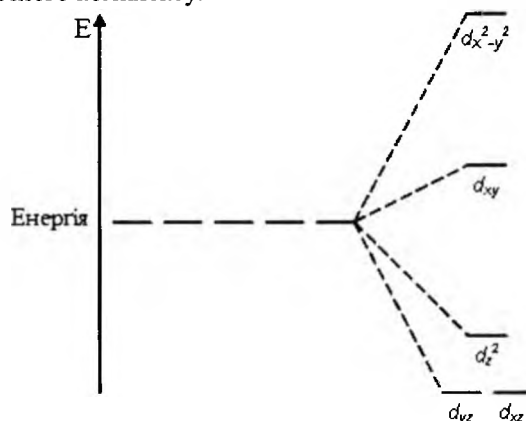







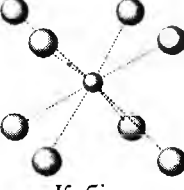








Рис. 2. Співвідношення енергій d-орбіталей при плоскоквадратичному оточенні лігандами.

Таблиця 1

Енергія d-орбітелей у кристалічному полі різних симетрій<sup>1</sup>

К.ч. <sup>2</sup>	Структура	$d_z^2$	$d_{x^2-y^2}$	$d_{xy}$	$d_{xz}$	$d_{yz}$	К.ч. <sup>2</sup>	Структура	$d_z^2$	$d_{x^2-y^2}$	$d_{xy}$	$d_{xz}$	$d_{yz}$
1	 Лінійна <sup>3</sup>	5,14	-3,14	3,14	0,57	0,57	6	 Октаедрична	6,00	6,0	-4,00	-4,00	-4,00
2	 Лінійна <sup>4</sup>	10,28	-6,28	-6,28	1,14	1,14	6	 Тригонально-призматична	0,96	5,84	5,84	5,36	5,36
3	 Тригональна	-3,21	5,46	5,46	-3,86	-3,86	7	 Пентагонально-біпірамідальна	4,93	2,82	2,82	-5,28	-5,28
4	 Тетраедрична	-2,67	2,67	1,78	1,78	1,78	8	 Кубічна	-5,34	-5,34	3,56	3,56	3,56
4	 Плоскоквдратична	-4,28	12,28	2,28	-5,14	-5,14	8	 Квадратно-антипризматична	-5,34	0,89	-0,89	3,56	3,56
5	 Тригонально-біпірамідальна	7,07	-0,82	0,82	2,72	-2,72	9	 [ReH <sub>9</sub> ] <sup>2-</sup>	-2,25	-0,38	-0,38	1,51	1,51
5	 Квадратно-пірамідальна	0,86	9,14	-0,86	-4,57	4,57	12	 Ікосаедрична	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

<sup>1</sup>Всі значення наведено в одиницях Dq; <sup>2</sup>координаційне число; <sup>3</sup>ліганди розташовані вздовж осі z; <sup>4</sup>ліганди розташовані у площині xy.

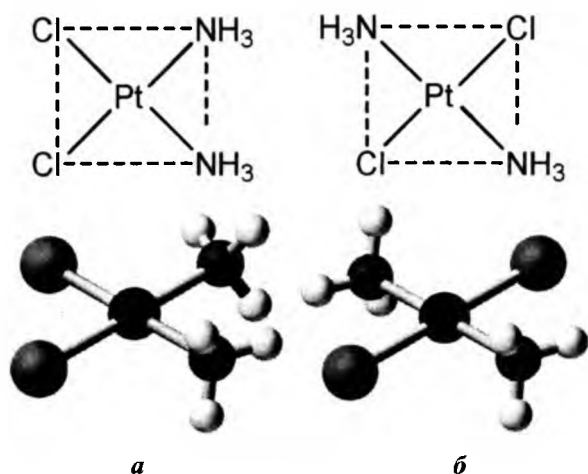


Рис. 3. Площинне та просторове зображення комплексів цис-дихлородіамінплатини (а) і транс-дихлородіамінплатини (б).

Плоскоквадратичні комплекси рідко проявляють оптичну ізомерію тому, що площина, утворена звичайними за складом лігандами (точніше донорними атомами лігандів) і центральним атомом, – є площиною їх симетрії. Винятки існують для комплексів  $Pt^{2+}$  і  $Pd^{2+}$  [4].

## II. Тетраедричні комплекси

У тетраедричних комплексах розщеплення можна пояснити наступним чином. У міру наближення ліганду до йону металу, електрони ліганду стають ближче до одних d-орбіталей, ніж до інших, викликаючи втрату виродженості (рис. 4). Електрони d-орбіталей і лігандів відштовхуються один від одного як заряди з однаковими знаками. Таким чином, енергія тих d-електронів, які розташовані близько до лігандів, стає вищою, ніж тих,

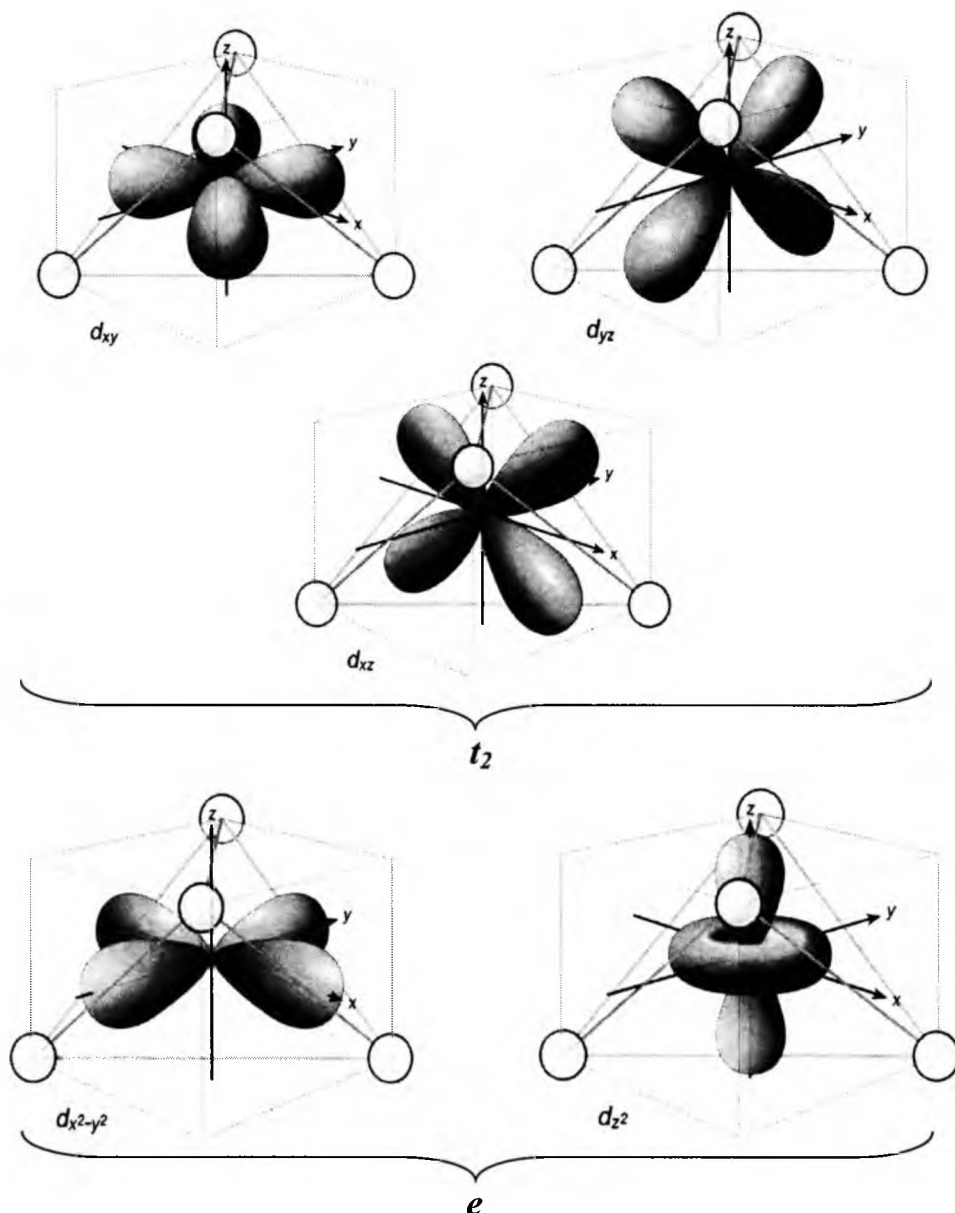


Рис. 4. Вплив тетраедричного кристалічного поля на d-орбіталі комплексоутворювача: спостерігається розщеплення на два рівні – орбіталі  $t_2$  ( $d_{xy}$ ,  $d_{yz}$ ,  $d_{xz}$ ) мають більшу енергію, ніж орбіталі  $e$  ( $d_{x^2-y^2}$  та  $d_z^2$ ).

які віддалені від лігандів, що призводить до розщеплення рівнів енергії d-орбіталей. Тетраедричне кристалічне поле розщеплює d-орбітали атома чи йону на дві групи еквівалентних орбіталей: двократно вироджені e-орбітали, які розташовані нижче трикратно вироджених t<sub>2</sub>-орбіталей, оскільки в тетраедричному комплексі немає центру симетрії, то позначення орбіталей не містить знаку парності g і u [1-3].

Різниця в енергіях орбіталей після розщеплення носить назву енергії розщеплення d-орбіталей кристалічним полем ( $\Delta$ ) (далі – енергія розщеплення). Вона виражається в одиницях Dq (міра сили електростатичного кристалічного поля), причому зміну енергії можна представити рівнянням:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 10Dq = \Delta. \quad (1)$$

При тетраедричному оточенні найближчими до лігандів є t<sub>2</sub>-орбітали (рис. 4), електрони яких відповідно зазнають більшого електростатичного відштовхування, порівняно з електронами e-орбіталей (рис. 4). Через різну енергію орбіталей відбувається розщеплення на t<sub>2</sub>-орбітали з вищою енергією та e-орбітали з нижчою енергією, що описується параметром розщеплення  $\Delta_{тетр}$  (рис. 5).

Варто зазначити, що оскільки орбітали буквально не зіштовхуються з лігандами, то параметр розщеплення у тетраедричному комплексі ( $\Delta_{тетр}$ ) менший, ніж в октаедричному ( $\Delta_{окт}$ ). Співвідношення величин параметрів розщеплення в октаедричному і тетраедричному комплексах залежить від кількості лігандів у комплексі: в октаедричному комплексі електричне поле створюється шістьма лігандами, а в тетраедричному – чотирма. Співвідношення параметрів розщеплення у цих комплексах математично виражається співвідношенням (2):

$$\Delta_{тетр} = \frac{4}{9} \Delta_{окт}. \quad (2)$$

Під час розрахунку енергії стабілізації кристалічного поля (ЕСКП) варто враховувати, що t<sub>2</sub>-орбітали заповнюються після e-орбіталей, а вклад кожної орбітали у загальну енергію рівний  $-\frac{3}{5} \Delta_T$  для елект-

рона e-орбітали і  $+\frac{2}{5} \Delta_T$  для електрона t<sub>2</sub>-орбітали (рис. 6) [7].

Утворенню тетраедричних комплексів сприяють стеричні чинники, які обумовлені як взаємним відштовхуванням заряджених лігандів, так і міжмолекулярним відштовхуванням великих лігандів. За теорією кристалічного поля тетраедричні комплекси, як правило, не стабілізовані у зв'язку з малими значеннями ЕСКП. Таким чином, формування тетраедричних комплексів сприяє взаємодії великих лігандів, наприклад Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, I<sup>-</sup>, і невеликих йонів металів з конфігурацією благородного газу ns<sup>2</sup>np<sup>6</sup>, наприклад Be<sup>2+</sup>, або з квазіконфігурацією благородного газу (n-1)d<sup>10</sup>ns<sup>2</sup>np<sup>6</sup>, наприклад Zn<sup>2+</sup> і Ga<sup>2+</sup>, а також йонів тих перехідних першнів,

які не схильні утворювати комплекси з іншими значеннями координаційного числа через малі значення ЕСКП, наприклад Co<sup>2+</sup> (d<sup>7</sup>) [4]. Тетраедричні комплекси не утворюють геометричних ізомерів, але є потенційно оптично-активними, як і тетраедричний атом Карбону [7].

Тетраедричні комплекси майже завжди високоспінові. Видно, що розщеплення для тетраедричних комплексів є меншим, ніж для октаедричних. Тому, навіть тоді, якщо ліганд буде сильного поля для октаедричного комплексу, то для тетраедричного комплексу розщеплення буде меншим, ніж доступне t<sub>2</sub>-орбіталам [8].

Значення та приклади розрахунку ЕСКП наведено у табл. 2 (для високоспінових тетраедричних комплексів) та у табл. 3 (для низькоспінових тетраедричних комплексів) [8-10].

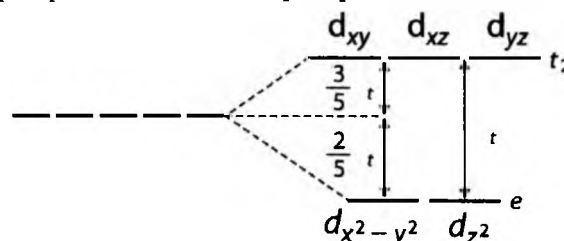


Рис. 5. Енергетичне розщеплення d-орбіталей комплексоутворювача у тетраедричному оточенні лігандами [5, 6].

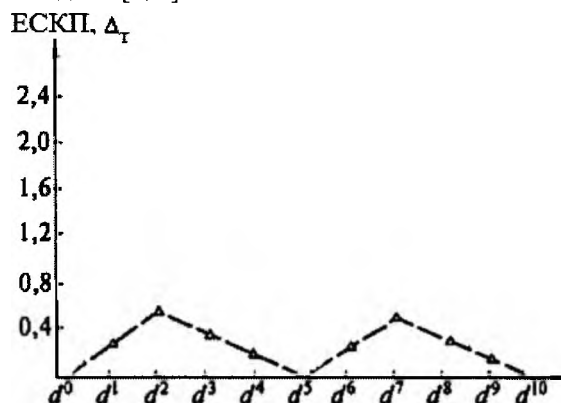


Рис. 6. Залежність ЕСКП від електронної конфігурації центрального йона у тетраедричному оточенні лігандів [7].

## Висновки

Теорія кристалічного поля розглядає різне просторове розташування d-орбіталей і пов'язану з цим різну зміну енергії d-електронів центрального атома, викликану взаємодією з електронними хмарами лігандів. Вплив тетраедричного електростатичного поля лігандів викликає розщеплення e<sub>g</sub> та t<sub>2g</sub> d-орбіталей комплексоутворювача, яке характеризується значенням енергії розщеплення  $\Delta_T$ , яка обумовлює утворення високоспінових та низькоспінових комплексів. У дослідженні приведено значення та приклади розрахунку енергії стабілізації кристалічним полем для низькоспінових та високоспінових тетраедричних комплексів.

Таблиця 2

Тетраедричні високоспінові комплекси

Електронна конфігурація	Комплексоутворювач	Розподіл електронів за орбіталями	Добуток кількості електронів на енергію	ЕСКП
$d^0$	$\text{Ca}^{2+}, \text{Sc}^{3+}, \text{Ti}^{4+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \text{---} \text{---} \text{---} t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \text{---} \text{---} e \end{array}$	$\begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array}$	0
$d^1$	$\text{Ti}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \text{---} \text{---} \text{---} t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \text{---} \text{---} e \end{array}$	$\begin{array}{c} 0 \\ -1 \times \frac{3}{5} \end{array}$	$-\frac{3}{5} \Delta_T$
$d^2$	$\text{Ti}^{2+}, \text{V}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \text{---} \text{---} \text{---} t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \uparrow \text{---} e \end{array}$	$\begin{array}{c} 0 \\ -2 \times \frac{3}{5} \end{array}$	$-\frac{6}{5} \Delta_T$
$d^3$	$\text{V}^{2+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{4+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \text{---} \text{---} t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \uparrow e \end{array}$	$\begin{array}{c} 1 \times \frac{2}{5} \\ -2 \times \frac{3}{5} \end{array}$	$\frac{4}{5} \Delta_T$
$d^4$	$\text{Cr}^{2+}, \text{Mn}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \uparrow \text{---} t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \uparrow e \end{array}$	$\begin{array}{c} 2 \times \frac{2}{5} \\ -2 \times \frac{3}{5} \end{array}$	$-\frac{2}{5} \Delta_T$
$d^5$	$\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \uparrow \uparrow t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \uparrow e \end{array}$	$\begin{array}{c} 3 \times \frac{2}{5} \\ -2 \times \frac{3}{5} \end{array}$	0
$d^6$	$\text{Fe}^{2+}, \text{Co}^{3+}, \text{Ni}^{4+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \uparrow \uparrow t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow e \end{array}$	$\begin{array}{c} 3 \times \frac{2}{5} \\ -3 \times \frac{3}{5} \end{array}$	$-\frac{3}{5} \Delta_T$
$d^7$	$\text{Co}^{2+}, \text{Ni}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \uparrow \uparrow t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow e \end{array}$	$\begin{array}{c} 3 \times \frac{2}{5} \\ -4 \times \frac{3}{5} \end{array}$	$-\frac{6}{5} \Delta_T$
$d^8$	$\text{Ni}^{2+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \uparrow t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow e \end{array}$	$\begin{array}{c} 4 \times \frac{2}{5} \\ -4 \times \frac{3}{5} \end{array}$	$-\frac{4}{5} \Delta_T$
$d^9$	$\text{Cu}^{2+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \uparrow t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow e \end{array}$	$\begin{array}{c} 5 \times \frac{2}{5} \\ -4 \times \frac{3}{5} \end{array}$	$-\frac{2}{5} \Delta_T$
$d^{10}$	$\text{Cu}^+, \text{Zn}^{2+}, \text{Ga}^{3+}, \text{Ge}^{4+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow e \end{array}$	$\begin{array}{c} 6 \times \frac{2}{5} \\ -4 \times \frac{3}{5} \end{array}$	0

Таблиця 3

Тетраедричні низькоспінові комплекси

Електронна конфігурація	Комплексоутворювач	Розподіл електронів за орбіталами	Добуток кількості електронів на енергію	ЕСКП
$d^0$	$\text{Ca}^{2+}, \text{Sc}^{3+}, \text{Ti}^{4+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \text{ --- } e \end{array}$	0 0	0
$d^1$	$\text{Ti}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \text{ --- } e \end{array}$	0 $-1 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{3}{5} \Delta_T$
$d^2$	$\text{Ti}^{2+}, \text{V}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \uparrow \text{ --- } e \end{array}$	0 $-2 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{6}{5} \Delta_T$
$d^3$	$\text{V}^{2+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Mn}^{4+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \text{ --- } e \end{array}$	0 $-3 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{9}{5} \Delta_T$
$d^4$	$\text{Cr}^{2+}, \text{Mn}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \text{ --- } e \end{array}$	0 $-4 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{12}{5} \Delta_T$
$d^5$	$\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \text{ --- } e \end{array}$	$1 \times \frac{2}{5}$ $-4 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{10}{5} \Delta_T$
$d^6$	$\text{Fe}^{2+}, \text{Co}^{3+}, \text{Ni}^{4+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \uparrow \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \text{ --- } e \end{array}$	$2 \times \frac{2}{5}$ $-4 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{8}{5} \Delta_T$
$d^7$	$\text{Co}^{2+}, \text{Ni}^{3+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \uparrow \uparrow \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \text{ --- } e \end{array}$	$3 \times \frac{2}{5}$ $-4 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{6}{5} \Delta_T$
$d^8$	$\text{Ni}^{2+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \uparrow \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \text{ --- } e \end{array}$	$4 \times \frac{2}{5}$ $-4 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{4}{5} \Delta_T$
$d^9$	$\text{Cu}^{2+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \text{ --- } t_2 \\ -\frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \text{ --- } e \end{array}$	$5 \times \frac{2}{5}$ $-4 \times \frac{3}{5}$	$-\frac{2}{5} \Delta_T$
$d^{10}$	$\text{Cu}^+, \text{Zn}^{2+}, \text{Ga}^{3+}, \text{Ge}^{4+}$	$\begin{array}{c} \frac{2}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \text{ --- } t_2 \\ \frac{3}{5} \Delta \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow \text{ --- } e \end{array}$	$6 \times \frac{2}{5}$ $-4 \times \frac{3}{5}$	0

### Література

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Coordination\\_geometry](https://en.wikipedia.org/wiki/Coordination_geometry).
2. К. Хаускрофт, Э. Констебл, Современный курс общей химии, т. 2 (Мир, Москва, 2002).
3. Ю.Д. Третьяков, В.И. Путляев, Введение в химию твердофазных материалов (Наука, Москва, 2006).
4. Хьюи, Неорганическая химия. Строение веществ и реакционная способность (Химия, Москва, 1987).
5. Д. Шрайвер, П. Эткинс, Неорганическая химия, т. 1 (Мир, Москва, 2004).
6. D. Shriver, P. Atkins, Inorganic Chemistry (Freeman and Company, New York, 2010).
7. Ю.Д. Третьяков, Неорганическая химия, т. 1 (Академия, Москва, 2004).
8. M.S. Silberberg, Principles of General Chemistry (Higher education, 2010).
9. U. Muller, Inorganic Structural Chemistry (John Wiley & Sons Inc., USA, 2006).
10. G. Oxtoby, Principles of Modern Chemistry (Thomson Learning Inc., USA, 2008).

**Татарчук Тетяна Романівна** – кандидат хімічних наук, доцент, член-кореспондент Академії технологічних наук України, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії.

**Куш Уляна Любомирівна** – студентка IV курсу кафедри неорганічної та фізичної хімії.