



## ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ/TECHNOLOGY OF INORGANIC SUBSTANCES

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.8.2>ГОМОЛОГИЧЕСКИЕ СЕРИИ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМЫ  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  НА БАЗЕ СОЕДИНЕНИЯ  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{30}$ 

Научная статья

Ундалов Ю.К.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (undal[at]yandex.ru)

**Аннотация**

В работе впервые представлен расчет формул гомологических серий химических соединений четырехкомпонентной системы  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  на базе соединения  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{30}$ . Формулы  $Ca_{20n-10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20n+10}$ ,  $Ca_{10}Ir^{4+}_{10n-5}Ir^{5+}_4O_{20n+10}$  и  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_{8n-4}O_{20n+10}$  отражают развитие гомологических серий в сторону CaO, IrO<sub>2</sub> и Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. При расчете использовались трех компонентные соединения  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20}$ ,  $Ca_2Ir^{4+}O_4$ , и  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{10}$ , которые являлись первыми базовыми соединениями в цепи последовательно протекающих химических взаимодействий в трех компонентных подсистемах  $(Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$ ,  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-})$  и  $(Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-})$ , начиная с образования CaO, IrO<sub>2</sub> и Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Соединения  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20}$ ,  $Ca_2Ir^{4+}O_4$ , и  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{10}$  участвуют в образовании  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{30}$ . По аналогии с известным катализатором  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$  соединение  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{30}$  в перспективе также может быть эффективным катализатором, например, при получении «экологического» водорода из воды. При использовании в катализаторах дорогостоящего металлического иридия следует допустить, что гомологи серии  $Ca_{20n-10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20n+10}$  могут быть кандидатами для замены известного термо- и кислотоустойчивого катализатора  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$ .

**Ключевые слова:** иридий, катализаторы, четырехкомпонентная система, ионы химических элементов, гомологические серии, химические соединения, заряженные кластеры, расчет.

HOMOLOGOUS SERIES OF CHEMICAL COMPOUNDS OF THE SYSTEM  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  BASED ON THE COMPOUND  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{30}$ 

Research article

Undalov Y.K.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* Corresponding author (undal[at]yandex.ru)

**Abstract**

The paper presents for the first time the calculation of formulas for homologous series of chemical compounds of a four-component system  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  based on the compound  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{30}$ . The formulas  $Ca_{20n-10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20n+10}$ ,  $Ca_{10}Ir^{4+}_{10n-5}Ir^{5+}_4O_{20n+10}$  and  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_{8n-4}O_{20n+10}$  reflect the development of homologous series towards CaO, IrO<sub>2</sub> and Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Three-component compounds  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20}$ ,  $Ca_2Ir^{4+}O_4$ , and  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{10}$  were used in the calculation, which were the first basic compounds in a chain of sequential chemical interactions in three component subsystems  $(Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$ ,  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-})$  and  $(Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  starting with the formation of CaO, IrO<sub>2</sub> and Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Compounds  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20}$ ,  $Ca_2Ir^{4+}O_4$ , and  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{10}$  are involved in the formation of  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{30}$ . By analogy with the well-known catalyst  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$ , the compound  $Ca_{10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{30}$  may also be an effective catalyst in the future, for example, when producing "ecological" hydrogen from water. When using expensive metallic iridium in catalysts, it should be assumed that the homologues of the  $Ca_{20n-10}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20n+10}$  series may be candidates for replacing the well-known thermo- and acid-resistant catalyst  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$ .

**Keywords:** iridium, catalysts, four-component system, ions of chemical elements, homologous series, chemical compounds, charged clusters, calculation.

**Введение**

Одним из способов прогнозирования новых химических соединений (ХС) является изучение гомологических серий (ГС). Особенностью ГС считается закономерное изменение фундаментальных характеристик ХС-гомологов в пределах одной и той же ГС [1], [2]. Следовательно, знание законов формирования ГС становится обязательным при поиске новых ХС различных систем химических элементов (ХЭ).

К настоящему моменту в литературе опубликованы результаты поиска ГС различных систем ХЭ. Так, известны «фазы Магнели»  $M_nO_{3n-1}$  ( $M = Mo, W$ ) [3],  $M_nO_{2n-1}$  ( $M \equiv Ti, V$ ) ( $n = 4-10$ ) [4], [5], [6],  $W_nO_{3n-2}$  ( $n = 20, 38-40$ ) [7] и «ГС» систем (La-Ni-O) [8], [9], [10], [11] и (La-Cu-O) [9]. Однако, на наш взгляд, при отсутствии соблюдения электронейтральности формул «ГС» приведенные выше системы авторами ошибочно считаются двухкомпонентными [3], [4], [5], [6], [7] и трехкомпонентными [8], [9], [10], [11] системами ХЭ соответственно. Например, соблюдая электронейтральность формул «ГС» правильно было бы писать так:

$Me_nO_{3n-1}$  [3]  $\equiv Me^{5+}_2Me^{6+}_{n-2}O_{3n-1}$ , где ( $Me \equiv Mo, W$ ) и  $n = 8-12, 14$ ;

или  $Me_nO_{2n-1}$  [4], [5]  $\equiv Me^{3+}_2Me^{4+}_{n-2}O_{2n-1}$ , где ( $Me \equiv Ti, V$ ) и  $n = 4-10$ ;

или  $W_nO_{3n-2}$  [7]  $\equiv W^{5+}_4W^{6+}_{n-4}O_{3n-2}$ , где  $n = 20, 38-40$ ,

а также  $La_nNi_nO_{3n-1}$  [8]  $\equiv La_nNi^{2+}_2Ni^{3+}_{n-2}O_{3n-1}$ ,  $La_{n+1}Ni_nO_{3n+1}$  [9]  $\equiv La_{n+1}Ni^{2+}Ni^{3+}_{n-1}O_{3n+1}$ ,  $La_{n+1}Ni_nO_{3n-1}$  [10]  $\equiv$

$\equiv La_{n+1}Ni^{2+}Ni^{3+}_{n-1}O_{3n-1}$  и  $La_{2n-4}Ni_nO_{4n-5}$  [11]  $\equiv La_{2n-4}Ni^{2+}_{n-2}Ni^{3+}_2O_{4n-5}$ .



В работах [12] и [13] указаны причины некорректного написания авторами этих работ формул «ГС»: во-первых, формулы не являются электро нейтральными. Другой причиной этого, видимо, является отсутствие знания законов формирования ГС. Как видно, подмеченное в [12] и [13] изменение выше приведенных составов образцов не соответствует формулам именно ГС, а, скорее всего, является случайным сочетанием какого-то изменения состава образцов, подчиняющейся опубликованной формуле, но не формуле ГС. Так, в выше приведенных авторских формулах «ГС» могут одновременно изменяться концентрационные параметры всех двух ХЭ [4], [5], [6], [7], [8] или всех трех ХЭ [8], [9], [10], [11], хотя, как это доказано в [13], в формуле именно ГС могут быть переменными концентрации только двух ХЭ, одного катиона и аниона. Другими словами, ГС могут развиваться в сторону только двухкомпонентных ХС (ДХС) [13].

В работах [12], [14], [15], [16], [17] впервые представлен способ расчета формул ГС трех-, четырех- и пятикомпонентных систем ионов ХЭ. Закономерное изменение состава гомологов одной и той же ГС определяется **геометрическими особенностями треугольника и треугольной пирамиды**, которые представляют систему ионами ХЭ. Способ расчета основан на рассмотрении **цепи последовательно протекающих химических взаимодействий компонентов системы**, начиная с образования двухкомпонентных ХС-окислов. Система ионов ХЭ представляется треугольником или треугольной пирамидой, в углах основания которых помещены положительно заряженные ионы ХЭ, а в вершине помещается анион. Геометрические особенности треугольника и треугольной пирамиды позволяют проследить последовательность химических взаимодействий, в результате чего появляется возможность из всех рассматриваемых реакций выявить те, которые участвуют в формировании ГС.

Используя этот, способ рассчитаны формулы ГС систем ионов ХЭ в обобщенном виде:

$$A_{nbc}B_{ac}C_{(n+1)ab}, A_{bc}B_{nac}C_{(n+1)ab} [12], A_{(2n-1)bdc}B_{adc}D_{abc}C_{(2n+1)abd}, A_{bdc}B_{adc}D_{(2n-1)abc}C_{(2n+1)abd}, A_{bdc}B_{(2n-1)adc}D_{abc}C_{(2n+1)abd} [14], [16],$$

$$A_{\{(n-1-k)(r+w+v)+t\}bdfc}B_{radfc}D_{wabfc}F_{vabdc}C_{\{(n-k)(r+w+v)+t\}abdf}, A_{bdfc}B_{\{(n-1-k)(t+w+v)+r\}adfc}D_{wabfc}F_{vabdc}C_{\{(n-k)(t+w+v)+r\}abdf},$$

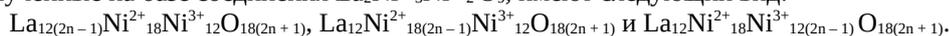
$$A_{bdfc}B_{radfc}D_{\{(n-1-k)(t+r+v)+w\}abfc}F_{vabdc}C_{\{(n-k)(t+r+v)+w\}abdf}, A_{bdfc}B_{radfc}D_{wabfc}F_{\{(n-1-k)(t+r+w+v)abdc}C_{\{(n-k)(t+r+w+v)abdf} [17], [19],$$

и для конкретных систем ионов ХЭ:  $(La^{3+} - Ni^{2+} - Ni^{3+} - O^{2-})$  [12],  $(Na^{+} - Ti^{4+} - O^{2-})$ ,  $(Li^{+} - Ti^{4+} - O^{2-})$ ,  $(K^{+} - V^{5+} - O^{2-})$ ,  $(Ba^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-})\{Li^{+} - Fe^{2+} - (PO_4)^{3-}\}$  [15],  $(Zn^{2+} - Ge^{4+} - P^{3-})$  [16],  $(Li^{+} - Fe^{4+} - [Sr_3La_2]^{12+} - O^{2-})$  [17],  $(Li^{+} - Ni^{3+} - Mn^{3+} - O^{2-})$  [18],  $(Bi^{3+} - Cu^{2+} - [SrCa]^{4+} - O^{2-})$  [19],  $(Li^{+} - Sr^{2+} - La^{3+} - Fe^{4+} - O^{2-})$  [20],  $(La^{3+} - Sr^{2+} - Ti^{4+} - O^{2-})$  [20], [21],  $(Bi^{3+} - Sr^{2+} - Ca^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-})$  [21],  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  [22],  $(Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$ ,  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-})$  и  $(Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  [23].

Считая «фазы Магнели» трехкомпонентными, осуществленный анализ показал, что все выше приведенные формулы «фаз Магнели» совпадают с формулами трехкомпонентных ХС (ТХС) ар-ГС [16] при следующих условиях:

- 1) для  $Me_nO_{2n-1}$  [4], [5]  $\equiv Me^{3+}_2Me^{4+}_{n-2}O_{2n-1}$  при  $n = 5, 8, 11, 14$  и т. д. формулы ТХС совпадают с формулами ТХС в ар-ГС  $A_{bc}^{a+}B_{acn}^{b+}C_{ab(n+1)}^{c-}$  [16]  $\equiv Me^{3+}_8Me^{4+}_{6n}O_{12(n+1)} \equiv Me^{3+}_4Me^{4+}_{3n}O_{6(n+1)}$  при  $n_{ар} = 2, 4, 6, 8$  и т.д.;
- 2) для  $Me_nO_{3n-2}$  [7]  $\equiv Me^{5+}_4Me^{6+}_{n-4}O_{3n-2}$  при  $n = 14, 24, 34, 44$  и т. д. формулы ТХС совпадают с формулами ТХС в ар-ГС  $A_{bc}^{a+}B_{acn}^{b+}C_{ab(n+1)}^{c-}$  [16]  $\equiv Me^{5+}_6Me^{6+}_{5n}O_{15(n+1)}$  при  $n_{ар} = 3, 6, 9, 12$  и т.д.;
- 3) для  $Me_nO_{3n-1}$  [3]  $\equiv Me^{5+}_2Me^{6+}_{n-2}O_{3n-1}$  при  $n = 12, 17, 22, 27$  и т. д. формулы ТХС совпадают с формулами ТХС в ар-ГС  $A_{bc}^{a+}B_{acn}^{b+}C_{ab(n+1)}^{c-}$  [16]  $\equiv Me^{5+}_6Me^{6+}_{5n}O_{15(n+1)}$  при  $n_{ар} = 6, 9, 12, 15$  и т.д.

Кроме этого, например, в работе [12] на базе пяти ЧХС $_{n(bas)} = La_2Ni^{2+}_3Ni^{3+}_2O_9$ ,  $La_4Ni^{2+}_6Ni^{3+}_6O_{18}$ ,  $La_8Ni^{2+}_{12}Ni^{3+}_{12}O_{27}$ ,  $La_8Ni^{2+}_6Ni^{3+}_{18}O_{45}$  и  $La_4Ni^{2+}_3Ni^{3+}_{12}O_{27}$ , рассчитано семнадцать четырехкомпонентных ГС (ЧГС). В частности, ЧГС, полученные на базе соединения  $La_2Ni^{2+}_3Ni^{3+}_2O_9$ , имеют следующий вид:



Расчеты ЧГС системы  $(La^{3+} - Ni^{2+} - Ni^{3+} - O^{2-})$  в [12] показали, что известные из работы [9] соединения  $La_3Ni_2O_7$ ,  $La_4Ni_3O_{10}$ ,  $La_5Ni_4O_{13}$  и  $La_6Ni_5O_{16}$ , относящихся к фазам Риддлсдена-Поппера  $La_{n+1}Ni_nO_{3n+1}$  [9], следовало бы записать иначе с учетом того, что они относятся к четырехкомпонентным системам ХЭ. Так, расчеты в [12] показали, что известные из работы [9] соединения  $(La_3Ni_2O_7 [9] \equiv La_6Ni^{2+}_2Ni^{3+}_2O_{14} = ЧХС_{n=2})$ ,  $(La_4Ni_3O_{10} [9] \equiv La_4Ni^{2+}Ni^{3+}_2O_{10} = ЧХС_{n=2})$ ,  $(La_5Ni_4O_{13} \equiv La_5Ni^{2+}Ni^{3+}_3O_{13} = ЧХС_{n=4})$  и  $(La_6Ni_5O_{16} \equiv La_6Ni^{2+}Ni^{3+}_4O_{16} = ЧХС_{n=5})$  оказались, согласно [12], вторыми членами в ЧГС:  $La_{10n-2}Ni^{2+}_6Ni^{3+}_6O_{15n+12}$ ,  $La_{8n-4}Ni^{2+}_3Ni^{3+}_6O_{12n+6}$ ,  $La_{22n-14}Ni^{2+}_6Ni^{3+}_{18}O_{33n+12}$  и  $La_{14n-10}Ni^{2+}_3Ni^{3+}_{12}O_{21n+6}$ . В [12] ЧХС рассчитывались на базе ЧХС $_{n(bas)} = La_8Ni^{2+}_6Ni^{3+}_6O_{27}$ ,  $La_4Ni^{2+}_3Ni^{3+}_6O_{18}$ ,  $La_8Ni^{2+}_{12}Ni^{3+}_{12}O_{27}$ ,  $La_8Ni^{2+}_6Ni^{3+}_{18}O_{45}$  и  $La_4Ni^{2+}_3Ni^{3+}_{12}O_{27}$ , соответственно. Как видно, формулы из работы [12] принципиально отличаются от опубликованных в работах [8], [9], [10] и [11] формул.

Важно отметить, что рассчитанные в работе [14] формулы трехкомпонентных ГС (ТГС) системы  $(M^{+} - Ti^{4+} - O^{2-})$ , где  $M^{+} \equiv Li^{+}, Na^{+}, K^{+}$ , полностью совпадают с формулой ТГС, полученной только на основе экспериментов [24], что говорит о работоспособности разработанного в [12], [13], [14], [15] способа расчета ГС многокомпонентных систем ионов ХЭ.

Расчет ГС систем  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  [21] и подсистем  $(Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$ ,  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-})$  и  $(Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  [23] с участием разно валентного иридия представляет интерес при поиске новых составов ХС, используемых в качестве электролитических катализаторов для производства «экологического» водорода путем электролитического разложения воды и для анодной реакции выделения кислорода в сильно кислотном электролите [25]. Поиск новых иридий содержащих катализаторов актуален из-за высокой стоимости и дефицита металлического иридия [25]. Это возможно, если эти исследования будут способствовать повышению каталитической активности нового состава образцов с участием разно валентного иридия,  $Ir^{4+}$  и  $Ir^{5+}$ . Так, в работе [22] для системы  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  на базе соединения  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$ , содержащего  $Ir^{4+}$  и  $Ir^{5+}$  в соотношении 1/2 [26], [27], рассчитаны формулы трех ГС, которые развиваются в сторону  $CaO$ ,  $IrO_2$  и  $Ir_2O_5$ :  $Ca_{7n-2}Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{7n+5}$ ,  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_{5n-4}O_{10n+2}$  и  $Ca_{25}Ir^{4+}Ir^{5+}_{14n-4}O_{35n+25}$ . Расчетами ГС трехкомпонентных подсистем  $(Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$ ,  $(Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  и  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-})$  на базе соединений  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20}$ ,  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{10}$ , и  $Ca_2Ir^{4+}O_4$ , соответственно, получены следующие формулы ГС:  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{10n+10}$ ,  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{10n+10}$ ,  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{5n+5}$ ,  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{5n+5}$ ,  $Ca_2Ir^{4+}_nO_{2n+2}$  и  $Ca_{2n}Ir^{4+}O_{2n+2}$ , соответственно. Причем, для подсистемы  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-})$  известные из экспериментальных работ [26], [27], [28], [29] и [30] соединения  $(Ca_2Ir^{4+}O_4 = ТХС_{n(bas)} = 1)$  и  $(Ca_2Ir^{4+}_2O_6 = ТХС_n = 2)$

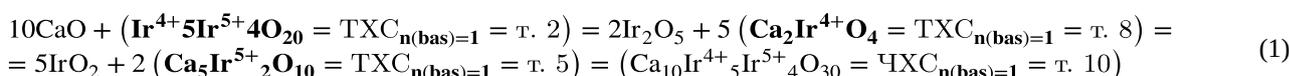
принадлежат  $\alpha$ -ГС,  $\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_n\text{O}_{2n+2}$ , которые развиваются в сторону  $\text{IrO}_2$ , а соединения ( $\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_4\text{O}_4 = \text{TXC}_{n(\text{bas})=1}$ ) и ( $\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}_6\text{O}_6 = \text{TXC}_{n=2}$ ), принадлежат  $\alpha$ -ГС,  $\text{Ca}_{2n}\text{Ir}^{4+}_n\text{O}_{2n+2}$ , которые развиваются в сторону  $\text{CaO}$ . Сказанное, также как расчеты ГС системы ( $(\text{M}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$ ) [14], говорит о работоспособности разработанного в работах [12], [13], [14], [15] способа расчета формул ГС многокомпонентных систем ионов ХЭ.

**Цель работы:** в настоящей работе продолжены расчеты четырехкомпонентных ГС ХС (ЧГС) системы ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) [22] на базе соединения  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$  расчетами ЧГС на базе соединения  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$  с использованием полученных расчетов в работе [23] трехкомпонентных ТХС, ( $\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_4\text{O}_4 = \text{TXC}_{n(\text{bas})=1}$ ), ( $\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{TXC}_{n(\text{bas})=1}$ ) и ( $\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{TXC}_{n(\text{bas})=1}$ ).

## Основная часть

### 2.1. Система ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ )

В настоящей работе при расчете ЧГС системы ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) кластер  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$  является базовым, ( $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ ). При представлении системы ионов ХЭ треугольником или треугольной пирамидой химические реагенты и продукты их взаимодействия в виде ХС или заряженного кластера (ЗК) располагаются на одном и том же отрезке прямой [12], [14]. Согласно работам [12], [14], любые ХС и ЗК находятся в точке пересечения отрезков, представляющих несколько разных пар реагентов. Следовательно, одной из реакций образования кластера  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$  является взаимодействие  $\text{TXC}_{n(\text{bas})=1}$  в виде т. 2, т. 5 и т. 8 с  $\text{CaO}$ ,  $\text{IrO}_2$  и  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ , соответственно, что отображается на рис. 1 пересечением отрезков (т. 2 –  $\text{CaO}$ ), (т. 5 –  $\text{IrO}_2$ ) и (т. 8 –  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ ) в т. 10, где (т. 10 =  $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_{20}\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{60}$ ) на рис. 1:



Кластеры в виде т. 2, т. 5 и т. 8 принадлежат подсистемам ( $\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) и ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), соответственно. Согласно [23], эти кластеры в виде т. 2, т. 5 и т. 8 также могут быть получены в результате окисления двухкомпонентных ХС ( $\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1}$ ) в виде (т. 3 =  $[\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{40+} = \text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1}$ ), (т. 6 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2]^{20+} = \text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1}$ ) и (т. 9 =  $[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}]^{8+} = \text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1}$ ), соответственно.

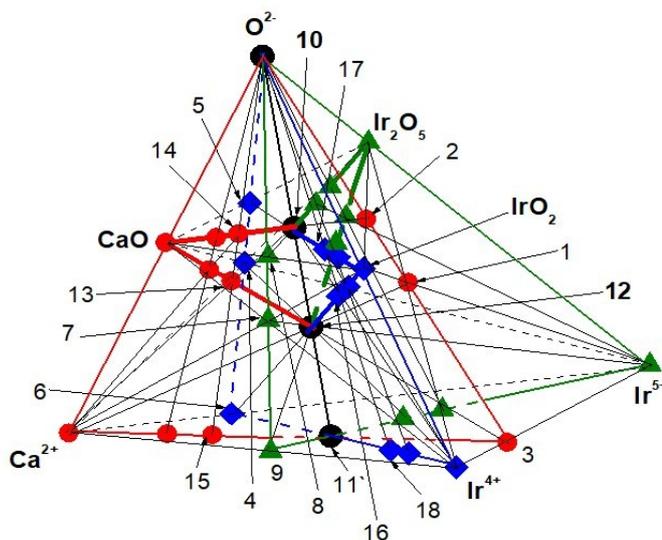


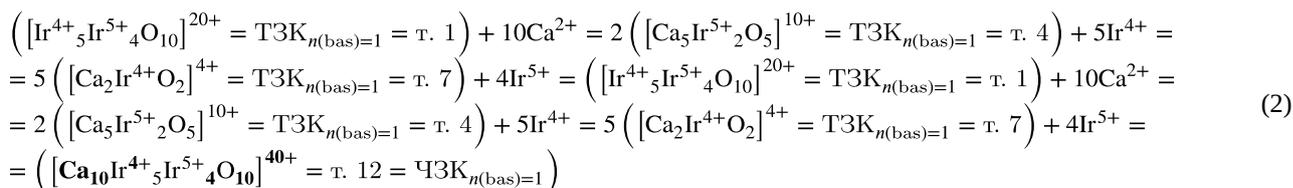
Рисунок 1 - Система ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) на базе соединения  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.8.2.1>

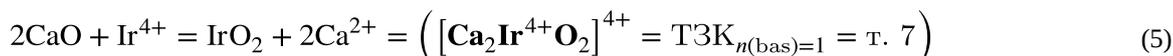
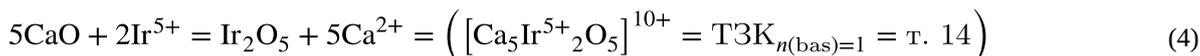
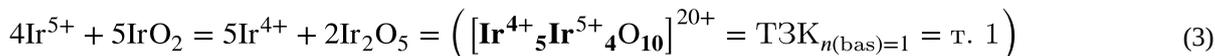
- т. 1 =  $\text{TЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{20+}$ , т. 2 =  $\text{TXC}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}$ ,  
 т. 3 =  $\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{40+}$ , т. 4 =  $\text{TЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5]^{10+}$ ,  
 т. 5 =  $\text{TXC}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}$ , т. 6 =  $\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2]^{20+}$ ,  
 т. 7 =  $\text{TЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_2\text{O}_2]^{4+}$ , т. 8 =  $\text{TXC}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_4\text{O}_4$ ,  
 т. 9 =  $\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}]^{8+}$ , т. 10 =  $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ ,  
 т. 11 =  $\text{TЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{60+}$ , т. 12 =  $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{40+}$ ,  
 т. 13 =  $\text{ЧХС}_{n=2} = [\text{Ca}_{30}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}]^{40+}$ , т. 14 =  $\text{ЧЗК}_{n=2} = \text{Ca}_{30}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{50}$ ,  
 т. 15 =  $[\text{Ca}_{30}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{100+}$ , т. 16 =  $\text{ЧЗК}_{n=2} = [\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{15}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}]^{40+}$ ,  
 т. 17 =  $\text{ЧХС}_{n=2} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{15}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{50}$ , т. 18 =  $[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{15}\text{Ir}^{5+}_4]^{100+}$



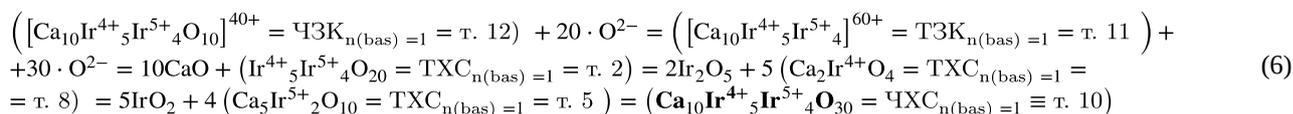
Кластер  $([\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{40+} = \text{ЧЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 12})$ , также являющийся базовым, образуется не только в результате взаимодействия кластеров в виде т. 3, т. 6 и т. 9 с  $\text{CaO}$ ,  $\text{IrO}_2$  и  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ , но и при взаимодействии кластеров в виде т. 1, т. 4 и т. 7 с  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ir}^{4+}$  и  $\text{Ir}^{5+}$ , соответственно (рис.1):



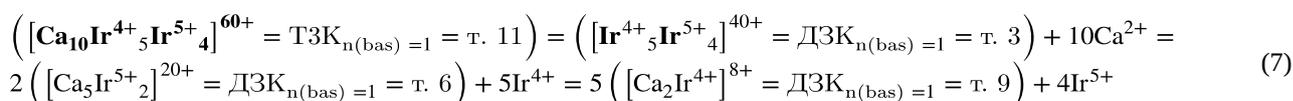
В свою очередь, согласно работе [23], кластеры в виде т. 1, т. 4 и т. 7 образуются так:



Именно кластеры в виде т. 1, т. 4 и т. 7, образующиеся по реакциям (3), (4) и (5), обуславливают пересечение отрезков (т. 1 –  $\text{Ca}^{2+}$ ), (т. 4 –  $\text{Ir}^{4+}$ ) и (т. 7 –  $\text{Ir}^{5+}$ ) в одной точке в виде кластера  $([\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{40+} = \text{т. 12} = \text{ЧЗК}_{n(\text{bas})=1})$ . Сказанное описывается уравнением (2) на рис. 1. Базовый кластер ( $\text{ЧЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ ) образуется не только по реакции (1), но и при окислении кластеров в виде т. 12 и т. 11– рис. 1:



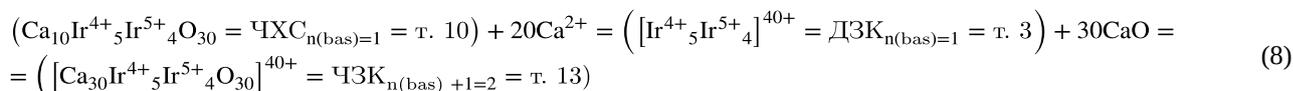
Кластер  $([\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{60+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 11})$ , также участвовавший в образовании базового кластера  $(\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10})$ , согласно реакции (6), образуется в результате взаимодействия кластеров в виде т. 3, т. 6 и т. 9 с  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ir}^{4+}$  и  $\text{Ir}^{5+}$ , соответственно:



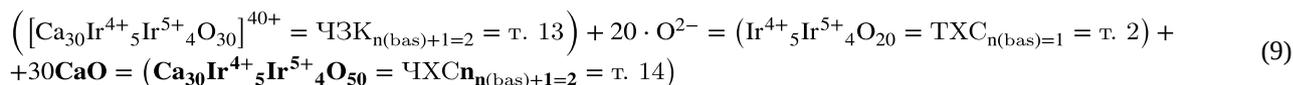
Согласно работе [13], ГС могут развиваться только в сторону двухкомпонентных ХС-окислов  $\text{CaO}$ ,  $\text{IrO}_2$  и  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ , что и будет учитываться ниже.

### 2.1.1. Подсистема ( $\text{Ca}^{2+} - \text{т. 3} - \text{O}^{2-}$ ). Направление $\text{CaO}$

Четырехкомпонентная ГС-1, которая развивается в сторону  $\text{CaO}$ , формируется в подсистеме (т. 3 –  $\text{Ca}^{2+} - \text{O}^{2-}$ ) на рис. 1, 2. Согласно [12], [13], [18] и рис. 1, 2, базовый кластер  $(\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10})$  может взаимодействовать только с  $\text{Ca}^{2+}$ , образуя кластер в виде (т. 13 =  $\text{ЧЗК}_{n(\text{bas})+1=2}$ ), чем и начинает формировать ГС-1. Кластер в виде т. 13 также может быть получен взаимодействием кластера в виде т. 3 с  $\text{CaO}$ , о чем свидетельствует пересечение соответствующих отрезков прямых (т. 10 –  $\text{Ca}^{2+}$ ) и (т. 3 –  $\text{CaO}$ ) на рис.1, 2:



В свою очередь, окисление кластера в виде т. 13 и взаимодействие кластера в виде т. 2 с CaO приводит к образованию в ГС-1 второго гомолога в виде (т. 14 = ЧХС<sub>n(bas)+1=2</sub>):



Тогда гомологическая разница Δ определится так:

$$\Delta = (\text{Ca}_{30}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{50} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 14}) - (\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10}) = \text{Ca}_{20}\text{O}_{20} \quad (10)$$

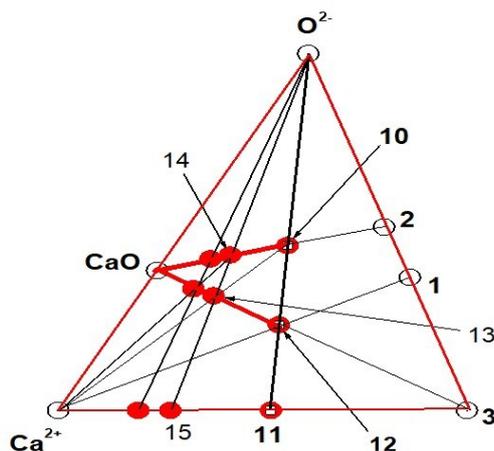


Рисунок 2 - Подсистема (Ca<sup>2+</sup> – т. 5 – O<sup>2-</sup>). Направление CaO  
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.8.2.2>

- т. 1 = ТЗК<sub>n(bas)=1</sub> = [Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>10</sub>]<sup>20+</sup>, т. 2 = ТХС<sub>n(bas)=1</sub> = Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>20</sub>,
- т. 3 = ДЗК<sub>n(bas)=1</sub> = [Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>]<sup>40+</sup>, т. 10 = ЧХС<sub>n(bas)=1</sub> = Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub>,
- т. 11 = ТЗК<sub>n(bas)=1</sub> = [Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>]<sup>60+</sup>, т. 12 = ЧХС<sub>n(bas)=1</sub> = [Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>10</sub>]<sup>40+</sup>,
- т. 13 = ЧЗК<sub>n(bas)+1=2</sub> = [Ca<sub>30</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub>]<sup>40+</sup>,
- т. 14 = ЧХС<sub>n(bas)+1=2</sub> = Ca<sub>30</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>50</sub>, т. 15 = [Ca<sub>30</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>]<sup>100+</sup>

Так как (ТХС<sub>n</sub> = ТХС<sub>n=1</sub> + k·Δ), (ТХС<sub>n=1</sub> = ТХС<sub>n(bas)</sub> - k<sub>bas</sub>·Δ) и (n<sub>(bas)</sub> = k<sub>bas</sub> + 1), то выясняется, что при определении ТХС<sub>n=1</sub>, вычитать формулу (Δ = Ca<sub>20</sub>O<sub>20</sub>) из формулы (Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub> = ЧХС<sub>n(bas)=1</sub> = т. 10) нельзя. Следовательно, k<sub>bas</sub> = 0 и n<sub>(bas)</sub> = 1. Тогда получим:

$$\begin{aligned} \text{Ветвь ХС-1} - (\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10}) + (\mathbf{n} - 1)\text{Ca}_{20}\text{O}_{20} = \\ = \text{Ca}_{20\mathbf{n}-10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20\mathbf{n}+10} \end{aligned} \quad (11)$$

### 2.1.2. Подсистема (Ir<sup>4+</sup> – т. 6 – O<sup>2-</sup>). Направление IrO<sub>2</sub>

Четырехкомпонентная ГС-2, которая развивается в сторону IrO<sub>2</sub>, формируется в подсистеме (т. 6 – Ir<sup>4+</sup> – O<sup>2-</sup>) на рис. 1, 3. Базовым кластером для ГС-2 также является кластер (Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub> = ЧХС<sub>n(bas)=1</sub> = т. 10). Формирование ГС-2 идет по той же схеме, что и формирование ГС-1: кластер (Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub> = ЧХС<sub>n(bas)=1</sub> = т. 10) может взаимодействовать только с Ir<sup>4+</sup> [12], [13], [18]. Пересечение отрезков (т. 10 – Ir<sup>4+</sup>) и (т. 6 – IrO<sub>2</sub>) отражает образование в ГС-2 кластера в виде (т. 16 = ЧЗК<sub>n(bas)+1=2</sub>), а пересечение отрезков (т.16 – O<sup>2-</sup>) и (т. 5 – IrO<sub>2</sub>) в т.17 соответствуют образованию в ГС-2 второго гомолога в виде (т. 17 = ЧХС<sub>n(bas)+1=2</sub>), что описывается следующими уравнениями реакций на рис. 1, 3:

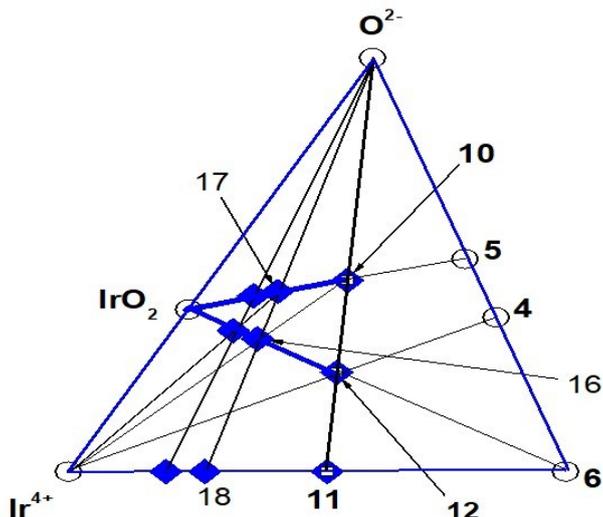
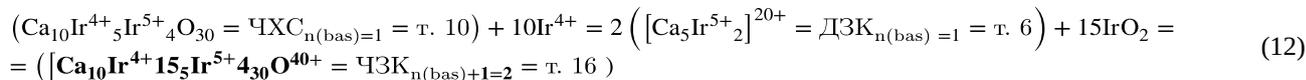
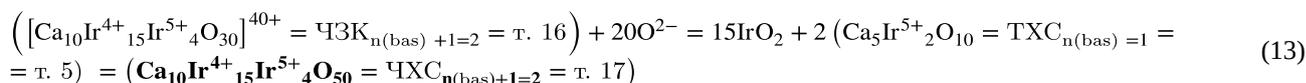


Рисунок 3 - Подсистема (Ir<sup>4+</sup> – т. 6 – O<sup>2-</sup>). Направление IrO<sub>2</sub>  
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.8.2.3>

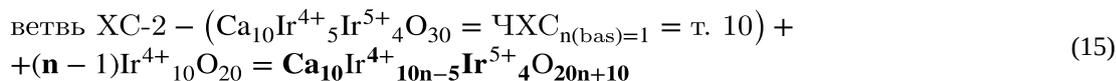
т. 4 = ТЗК<sub>n(bas)=1</sub> = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>5</sub>]<sup>10+</sup>, т. 5 = ТХС<sub>n(bas)=1</sub> = Ca<sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>10</sub>,  
т. 6 = ДЗК<sub>n(bas)=1</sub> = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>]<sup>20+</sup>, т. 10 = ЧХС<sub>n(bas)</sub> = Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub>,  
т. 11 = ТЗК<sub>n(bas)=1</sub> = [Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>]<sup>60+</sup>, т. 12 = ЧХС<sub>n(bas)</sub> = [Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>10</sub>]<sup>40+</sup>,  
т. 16 = ЧЗК<sub>n(bas)+1=2</sub> = [Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>15</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub>]<sup>40+</sup>,  
т. 17 = ЧХС<sub>n(bas)+1=2</sub> = Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>15</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>50</sub>, т. 18 = [Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>15</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>]<sup>100+</sup>



Гомологическая разница Δ определится так:

$$\begin{aligned} \Delta & = (\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{15}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{50} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 17}) - \\ & - (\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10}) = \text{Ir}^{4+}_{10}\text{O}_{20} \end{aligned} \quad (14)$$

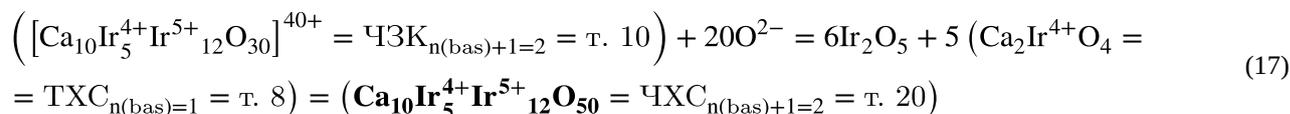
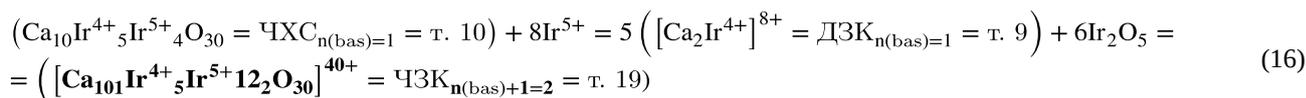
Так как (ТХС<sub>n</sub> = ТХС<sub>n-1</sub> + k·Δ), (ТХС<sub>n-1</sub> = ТХС<sub>n(bas)</sub> - k<sub>bas</sub>·Δ) и (n<sub>(bas)</sub> = k<sub>bas</sub> + 1), то выясняется, что при определении ТХС<sub>n=1</sub>, вычитать формулу (Δ = Ir<sup>4+</sup><sub>10</sub>O<sub>20</sub>) из формулы (Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub> = ТХС<sub>n(bas)=1</sub> = т. 10) нельзя. Следовательно, k<sub>bas</sub> = 0 и n<sub>(bas)</sub> = 1. Тогда получим:



### 2.1.3. Подсистема (Ir<sup>5+</sup> – т. 9 – O<sup>2-</sup>). Направление Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

Гомологическая серия ГС-3, которая развивается в сторону Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, формируется в подсистеме (т. 9 – Ir<sup>5+</sup> – O<sup>2-</sup>) на рис. 1, 4. Базовым кластером для ГС-3 также является кластер (Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub> = ЧХС<sub>n(bas)=1</sub> = т. 10). Формирование ГС-3 идет по той же схеме, что и формирование ГС-1 и ГС-2: базовый кластер (Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>30</sub> = ЧХС<sub>n(bas)=1</sub> = т. 10) может взаимодействовать только с Ir<sup>5+</sup> [12], [13], [18]. Пересечение отрезков (т. 10 – Ir<sup>5+</sup>) и (т. 9 – Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) отражает образование в ГС-3 второго гомолога в виде (т. 19 = ЧЗК<sub>n(bas)+1=2</sub>), а пересечение отрезков (т. 19 – O<sup>2-</sup>) и (т. 8 – Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) в т. 20

соответствуют образованию в ГС-3 второго гомолога в виде (т. 20 = ЧХС<sub>n(bas)+1=2</sub>), что описывается следующими уравнениями реакций на рис. 1, 4:



Гомологическая разница  $\Delta$  определится так:

$$\begin{aligned} \Delta & = (\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{12}\text{O}_{50} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 20}) - \\ & - (\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10}) = \text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{20} \end{aligned} \quad (18)$$

Так как ( $\text{ТХС}_n = \text{ТХС}_{n-1} + k \cdot \Delta$ ), ( $\text{ТХС}_{n-1} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})} - k_{\text{bas}} \cdot \Delta$ ) и ( $n_{(\text{bas})} = k_{\text{bas}} + 1$ ), то выясняется, что при определении  $\text{ТХС}_{n-1}$ , вычитать формулу ( $\Delta = \text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{20}$ ) из формулы ( $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10}$ ) нельзя. Следовательно,  $k_{\text{bas}} = 0$  и  $n_{(\text{bas})} = 1$ . Тогда получим:

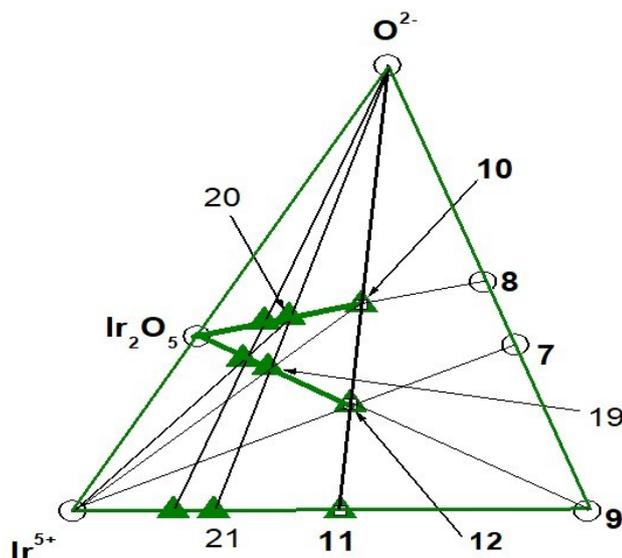
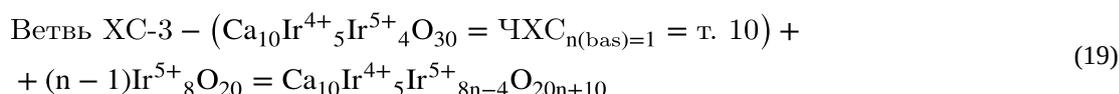


Рисунок 4 - Подсистема ( $\text{Ir}^{5+} - \text{т. 7} - \text{O}^{2-}$ ). Направление  $\text{Ir}_2\text{O}_5$   
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.8.2.4>

- т. 7 =  $\text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_2]^{4+}$ , т. 8 =  $\text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4$ ,  
т. 9 =  $\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}]^{8+}$ , т. 10 =  $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ ,  
т. 11 =  $[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{60+}$ , т. 12 =  $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{40+}$ ,  
т. 19 =  $\text{ЧЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = [\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{12}\text{O}_{30}]^{40+}$ ,  
т. 20 =  $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{12}\text{O}_{50}$ , т. 21 =  $[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{12}]^{100+}$

На рис. 5 для сравнения представлены гомологические серии, сформированные в подсистеме ( $\text{CaO} - \text{IrO}_2 - \text{Ir}_2\text{O}_5$ ) на базе соединений  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$  [22] и  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ . При условии, что существование ( $\text{ЧХС}_{n=3} = \text{т. 30} = \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_{11}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{32}$ ) [22] и ( $\text{ЧХС}_{n=3} = \text{т. 23} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{25}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{70}$ ) – членов ГС, сформированных на базе ( $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 25} = \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ ) [22] и ( $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ ), будет подтверждено экспериментально, интересно сравнить свойства кластеров в виде т. 30 и т. 23. Так, если допустить существование влияния на процесс катализа окислительно-восстановительной реакции ( $\text{Ir}^{4+} \leftrightarrow \text{Ir}^{5+} + e^-$ ), то близко расположенные составы ЧХС в виде т. 30 и т. 23, обладающие различным соотношением  $\text{Ir}^{4+}/\text{Ir}^{5+} = 11/2 = 5,5$  и  $\text{Ir}^{4+}/\text{Ir}^{5+} = 25/4 = 6,25$ , соответственно, вероятнее всего, могут представлять интерес с точки зрения изучения влияния соотношения  $\text{Ir}^{4+}/\text{Ir}^{5+}$  на эффективность катализа из-за различных условий наступления динамического равновесия в этом процессе.

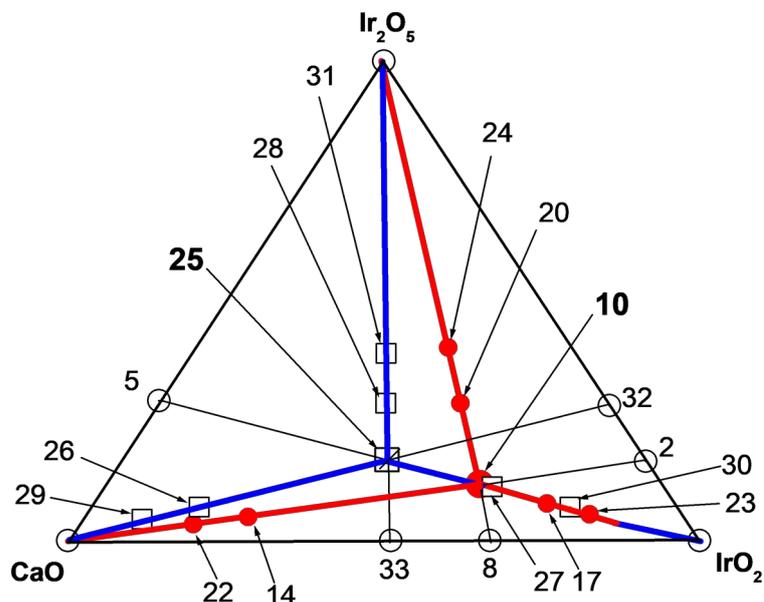


Рисунок 5 - Подсистема (CaO – IrO<sub>2</sub> – Ir<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)  
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2026.8.2.5>

На рис. 5 изображены гомологические серии  $\text{Ca}_{20n-10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20n+10}$ ,  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{10n-5}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20n+10}$  и  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{8n-4}\text{O}_{20n+10}$ , сформированные на базе соединения  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ , где ( $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 10} = \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ ),  $\text{ЧХС}_{n=2} -$  (т. 14 =  $\text{Ca}_{30}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{50}$ ), (т. 17 =  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{15}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{50}$ ), (т. 20 =  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{12}\text{O}_{50}$ );  $\text{ЧХС}_{n=3} -$  (т. 22 =  $\text{Ca}_{50}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{70}$ ), (т. 23 =  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{25}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{70}$ ), (т. 24 =  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{20}\text{O}_{70}$ ); а также гомологические серии  $\text{Ca}_{7n-2}\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{7n+5}$ ,  $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14n-4}\text{O}_{35n+25}$  и  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_{5n-4}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10n+2}$ , сформированные на базе соединения  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$  [22], где ( $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 25} = \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ ),  $\text{ЧХС}_{n=2} -$  (т. 26 =  $\text{Ca}_{12}\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{19}$ ), (т. 27 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_6\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{22}$ ), (т. 28 =  $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{24}\text{O}_{95}$ );  $\text{ЧХС}_{n=3} -$  (т. 29 =  $\text{Ca}_{19}\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{26}$ ), (т. 30 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_{11}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{32}$ ), (т. 31 =  $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{38}\text{O}_{130}$ );  $\text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} -$  (т. 2 =  $\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}$ ), (т. 5 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}$ ), (т. 8 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_2\text{O}_7$ ), (т. 32 =  $\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7$ ), (т. 33 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_2\text{O}_7$ ).

Кроме этого, важно сравнить влияние на каталитические свойства кристаллической структуры ХС ( $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$  = т. 25 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ ) [22] и ( $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{25}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{70}$  = т. 23 =  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{25}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{70}$ ), расположенных на одном и том же отрезке (т. 5 –  $\text{IrO}_2$ ), но гомологически связанных с разными базовыми  $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$  [22] и  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$  — основателями разных ЧГС.

### Заключение

Расчет ГС ХС системы ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) осуществлен при представлении системы ионами ХЭ и рассмотрением цепи последовательно протекающих химических взаимодействий компонент системы начиная с образования  $\text{CaO}$ ,  $\text{IrO}_2$  и  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ . Геометрические особенности треугольной пирамиды, представляющей систему ионов ХЭ, позволили из всех рассмотренных реакций химического взаимодействия выбрать те, которые отвечают за формирование ГС. При расчете использован базовый кластер ( $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1}$ ), одной из реакций образования которого является взаимодействие первых гомологов  $\text{ТХС}_{n(\text{bas})=1}$  трехкомпонентных подсистем ( $\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ) и ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ):  $\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}$ ,  $\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_2\text{O}_4$ , и  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}$ .

Расчитанные формулы ЧГС развиваются в сторону  $\text{CaO}$ ,  $\text{IrO}_2$  и  $\text{Ir}_2\text{O}_5$  и имеют следующий вид:  $\text{Ca}_{20n-10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20n+10}$ ,  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{10n-5}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20n+10}$  и  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{8n-4}\text{O}_{20n+10}$ . Графическое представление ЧГС, сформированных в подсистеме ( $\text{CaO} - \text{IrO}_2 - \text{Ir}_2\text{O}_5$ ) на базе соединений  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_2\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$  [22] и  $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$ , дают повод для изучения возможного влияния процесса окисление-восстановление ( $\text{Ir}^{4+} \leftrightarrow \text{Ir}^{5+} + \text{e}$ ) на процесс катализа. Полученные формулы ЧГС дают возможность взять поиск новых соединений – возможно, лучших претендентов на замену уже известных, используемых в качестве катализаторов при получении «экологического» водорода.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Урусов В.С. Теоретическая кристаллохимия / В.С. Урусов. — Москва : МГУ, 1987.
2. Ковба Л.М. Стехиометрия, дефекты в кристаллах и структурная гомология / Л.М. Ковба. — Москва : Знание, 1988.
3. Beznosikov V.V. Crystal chemistry and prediction of new compounds  $ABX_6$  / V.V. Beznosikov // Journal of Structural Chemistry. — 1991. — Vol. 32. — № 3. — P. 311–315.
4. Magneli A. Sundkvist G. Studies on molybdenum and molybdenum wolfram oxides of the homologous series  $Me_nO_{3n-1}$  / A. Magneli, B. Blomberg, H.L. Kihlberg // Acta chem. scand. — 1955. — Vol. 9. — № 8. — P. 1382–1390. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.09-1382.
5. Andersson S. Phase analysis studies on the titanium-oxygen system / S. Andersson, B. Collen, U. Kuylenstierna [et al.] // Acta Chemica Scandinavica. — 1957. — Vol. 11. — № 10. — P. 1641–1652. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.11-1641.
6. Andersson S. Studies on vanadium oxides / S. Andersson // Acta Chemica Scandinavica. — 1954. — Vol. 8. — № 9. — P. 1599–1606. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.08-1599.
7. Gado P. Wolfram tantalum and wolfram niobium oxides of the  $M_nO_{3n-2}$  ( $ReO_3$ ) series / P. Gado, B. Holmberg, A. Magneli // Acta Chemica Scandinavica. — 1965. — Vol. 19. — № 8. — P. 2010–2011. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.19-2010.
8. Gay P.L. Vacancy ordering in anion deficient  $LaNiO_3$  / P.L. Gay, C.N.R. Rao // Zeitschrift für Naturforschung A. — 1975. — Vol. 30. — № 18. — P. 1092–1093.
9. Li Z. Epitaxial growth and electronic structure of Ruddlesden-Popper nickelates ( $La_{n+1}Ni_nO_{3n+1}$ ,  $n = 1-5$ ) / Z. Li, W. Guo, N.N. Zhang [et al.] // APL Materials. — 2020. — Vol. 8. — DOI: 10.1063/5.0018934.
10. Drennan J. An electron microscope investigation of phases in the system  $Ln-Ni-O$  / J. Drennan, C.P. Tavares, B.C.H. Steele // Materials Research Bulletin. — 1982. — Vol. 17. — № 5. — P. 621–626. — DOI: 10.1016/0025-5408(82)90046-3.
11. Савченко В.Ф. Синтез и электрические свойства двойного оксида лантана и никеля / В.Ф. Савченко, И.Я. Любкина // Неорганические материалы. — 1986. — Т. 22. — № 9. — С. 1483–1486.
12. Ундалов Ю.К. Гомологические серии химических соединений в четырехкомпонентных системах ( $A^{a+} - B^{b+} - D^{d+} - C^{c-}$ ) и ( $La^{3+} - Ni^{2+} - Ni^{3+} - O^{2-}$ ) в обобщенном виде / Ю.К. Ундалов // Cifra. Химия. — 2024. — № 1 (1). — DOI: 10.18454/CHEM.2024.1.2.
13. Ундалов Ю.К. О формировании гомологических серий (рядов) химических соединений в многокомпонентных системах ионов химических соединений / Ю.К. Ундалов // Cifra. Химия. — 2025. — № 1 (4). — DOI: 10.60797/CHEM.2025.4.2.
14. Ундалов Ю.К. Прогнозирование формул многокомпонентных химических соединений: трехкомпонентные системы, формирование гомологических серий соединений / Ю.К. Ундалов // Журнал неорганической химии. — 1998. — Т. 43. — № 9. — С. 1561–1564.
15. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds: ( $Li^+ - Ti^{4+} - O^{2-}$ ), ( $Na^+ - Ti^{4+} - O^{2-}$ ), ( $K^+ - V^{5+} - O^{2-}$ ), ( $Ba^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-}$ ) and four-component systems  $\{Li^+ - Fe^{2+} - (PO_4)^{3-}\}$  / Yu.K. Undalov, E.I. Terukov, D.V. Agafonov [et al.] // Izvestia of St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University). — 2021. — Vol. 59. — № 85. — P. 26–36. — DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-26-36.
16. Undalov Yu.K. Homologous Series of Chemical Compounds in Three-component Systems ( $A^{a+} - B^{b+} - C^{c-}$ ) and ( $Zn^{2+} - Ge^{4+} - P^{3-}$ ) in Generalized Form / Yu.K. Undalov // IgMin Research. — 2023. — Vol. 1. — № 1. — P. 60–69. — DOI: 10.61927/igmin117.
17. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): five-component systems ( $A^{a+} - F^{f+} - [B_{rd}D_{wb}]^{(r+w)bd+} - C^{c-}$ ) and ( $Li^+ - Fe^{4+} - [Sr_3La_2]^{12+} - O^{2-}$ ) / Yu.K. Undalov // Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA : materials of International University Scientific Forum, September 19, 2023. — Pt. 2. — P. 110–125. — DOI: 10.34660/inf.2023.53.27.230.
18. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds of ( $Li^+ - Ni^{3+} - Mn^{3+} - O^{2-}$ ) system / Yu.K. Undalov, E.I. Terukov, D.S.V. Agafonov [et al.] // Proceedings of St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University). — 2023. — Vol. 60. — № 86. — P. 11–17. — DOI: 10.36807/1998-9849-2022-60-86-11-17.
19. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds in the systems ( $A^{a+} - F^{f+} - [B_{rd}D_{wb}]^{(r+w)bd+} - C^{c-}$ ) and ( $Bi^{3+} - Cu^{2+} - [SrCa]^{4+} - O^{2-}$ ) in generalized form / Yu.K. Undalov // Cifra. Chemistry. — 2024. — Vol. 1. — № 1. — DOI: https://doi.org/10.18454/CHEM.2024.1.3.
20. Undalov Yu.K. Calculation of homologous series of chemical compounds of system ( $La^{3+} - Sr^{2+} - Ti^{4+} - O^{2-}$ ), ( $Li^+ - Sr^{2+} - La^{3+} - Fe^{4+} - O^{2-}$ ) / Yu.K. Undalov // Science. Education. Practice : proceedings of the International Science Conference, March 26, 2025, Delhi, India. — Pt. 2. — P. 137–146. — DOI: 10.34659/INF.2025.23.47.055.
21. Ундалов Ю.К. Расчет гомологических серий химических соединений систем  $\{Li^+ - Fe^{2+} - (PO_4)^{3-}\}$ , ( $La^{3+} - Sr^{2+} - Ti^{4+} - O^{2-}$ ), ( $Bi^{3+} - Sr^{2+} - Ca^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-}$ ) / Ю.К. Ундалов // Cifra. Химия. — 2025. — Т. 2. — № 5. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.5.2.



22. Ундалов Ю.К. Гомологические серии химических соединений системы  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  на базе соединения  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$  / Ю.К. Ундалов // Cifra. Khimiya. — 2025. — Т. 3. — № 6. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.6.2.
23. Ундалов Ю.К. Формирование гомологических серий химических соединений в системах  $(Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$ ,  $(Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  и  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-})$  на базе соединений  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20}$ ,  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{10}$  и  $Ca_2Ir^{4+}O_4$  / Ю.К. Ундалов // Cifra. Khimiya. — 2025. — Т. 4. — № 7. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.7.3.
24. Clearfield A. Preparation, structure, and ion-exchange properties of  $Na_4Ti_9O_{20} \cdot xH_2O$  / A. Clearfield, J. Lehto // Journal of Solid State Chemistry. — 1988. — Vol. 73. — № 1. — P. 98–106. — DOI: 10.1016/0022-4596(88)90059-X.
25. Chunyan Wang. Recent advances in iridium-based catalysts with different dimensions for the acidic oxygen evolution reaction / Chunyan Wang, Fulin Yang, Ligang Feng // Nanoscale Horizons. — 2023. — Vol. 8. — P. 1174–1193. — DOI: 10.1039/D3NH00156C.
26. Wakeshina M. Electrical and magnetic properties of pseudo-one-dimension calcium iridium oxide  $Ca_5Ir_3O_{12}$  / M. Wakeshina, N. Taira, Y. Hinatsu [et al.] // Solid State Communications. — 2003. — Vol. 125. — № 6. — P. 311–315. — DOI: 10.1016/s0038-1098(02)00823-2.
27. Bozal-Ginesta C. Spectroelectrochemistry of water oxidation kinetics in molecular versus heterogeneous oxide iridium electrocatalysts / C. Bozal-Ginesta, R.R. Rao, C.A. Mesa [et al.] // Journal of the American Chemical Society. — 2022. — Vol. 144. — № 19. — P. 8454–8459. — DOI: 10.1021/jacs.2c02006.
28. Burnett D.L. Exploiting the flexibility of the pyrochlore composition for acid-resilient iridium oxide electrocatalysts in proton exchange membranes / D.L. Burnett, T. Petrucco, R.J. Kashtiban [et al.] // Journal of Materials Chemistry A. — 2021. — Vol. 9. — № 44. — P. 25114–25125. — DOI: 10.1039/D1TA05457K.
29. Sarkozy R.F. The characterization of calcium iridium oxides / R.F. Sarkozy, C.W. Moeller, B.L. Chamberland // Journal of Solid State Chemistry. — 1974. — Vol. 9. — № 3. — P. 242–246. — DOI: 10.1016/0022-4596(74)90080-2.
30. Keawprak N. Thermoelectric properties of Ca–Ir–O compounds prepared by spark plasma sintering / N. Keawprak, R. Tu, T. Goto // Materials Transactions. — 2009. — Vol. 50. — № 4. — P. 853–858. — DOI: 10.2320/matertrans.MRA2008377.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Urusov V.S. Teoreticheskaya kristalloghimiya [Theoretical crystal chemistry] / V.S. Urusov. — Moscow : MSU, 1987. [in Russian]
2. Kovba L.M. Stekhiometriya, defekty v kristallakh i strukturnaya gomologiya [Stoichiometry, defects in crystals and structural homology] / L.M. Kovba. — Moscow : Znanie, 1988. [in Russian]
3. Beznosikov V.V. Crystal chemistry and prediction of new compounds  $ABX_6$  / V.V. Beznosikov // Journal of Structural Chemistry. — 1991. — Vol. 32. — № 3. — P. 311–315.
4. Magneli A. Sundkvist G. Studies on molybdenum and molybdenum wolfram oxides of the homologous series  $Me_nO_{3n-1}$  / A. Magneli, B. Blomberg, H.L. Kihlberg // Acta chem. scand. — 1955. — Vol. 9. — № 8. — P. 1382–1390. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.09-1382.
5. Andersson S. Phase analysis studies on the titanium-oxygen system / S. Andersson, B. Collen, U. Kuylenstierna [et al.] // Acta Chemica Scandinavica. — 1957. — Vol. 11. — № 10. — P. 1641–1652. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.11-1641.
6. Andersson S. Studies on vanadium oxides / S. Andersson // Acta Chemica Scandinavica. — 1954. — Vol. 8. — № 9. — P. 1599–1606. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.08-1599.
7. Gado P. Wolfram tantalum and wolfram niobium oxides of the  $M_nO_{3n-2}$  ( $ReO_3$ ) series / P. Gado, B. Holmberg, A. Magneli // Acta Chemica Scandinavica. — 1965. — Vol. 19. — № 8. — P. 2010–2011. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.19-2010.
8. Gay P.L. Vacancy ordering in anion deficient  $LaNiO_3$  / P.L. Gay, C.N.R. Rao // Zeitschrift für Naturforschung A. — 1975. — Vol. 30. — № 18. — P. 1092–1093.
9. Li Z. Epitaxial growth and electronic structure of Ruddlesden-Popper nickelates  $(La_{n+1}Ni_nO_{3n+1}, n = 1-5)$  / Z. Li, W. Guo, N.N. Zhang [et al.] // APL Materials. — 2020. — Vol. 8. — DOI: 10.1063/5.0018934.
10. Drennan J. An electron microscope investigation of phases in the system Ln-Ni-O / J. Drennan, C.P. Tavares, B.C.H. Steele // Materials Research Bulletin. — 1982. — Vol. 17. — № 5. — P. 621–626. — DOI: 10.1016/0025-5408(82)90046-3.
11. Savchenko V.F. Sintez i elektricheskie svoystva dvoynogo oksida lantana i nikelya [Synthesis and electrical properties of double oxide of lanthanum and nickel] / V.F. Savchenko, I.Ya. Lyubkina // Neorganicheskie materialy [Inorganic materials]. — 1986. — Vol. 22. — № 9. — P. 1483–1486. [in Russian]
12. Undalov Yu.K. Gomologicheskie serii khimicheskikh soedineniy v chetyrekhkomponentnykh sistemakh  $(A^{a+} - B^{b+} - D^{d+} - C^{c-})$  i  $(La^{3+} - Ni^{2+} - Ni^{3+} - O^{2-})$  v obobshchennom vide [Homologous series of chemical compounds in four-component systems  $(A^{a+} - B^{b+} - D^{d+} - C^{c-})$  and  $(La^{3+} - Ni^{2+} - Ni^{3+} - O^{2-})$  in a generalized form] / Yu.K. Undalov // Cifra. Khimiya [Cifra. Chemistry]. — 2024. — № 1 (1). — DOI: 10.18454/CHEM.2024.1.2. [in Russian]
13. Undalov Yu.K. O formirovaniy gomologicheskikh seriy (ryadov) khimicheskikh soedineniy v mnogokomponentnykh sistemakh ionov khimicheskikh soedineniy [On the formation of homologous series (rows) of chemical compounds in multicomponent systems of ions of chemical compounds] / Yu.K. Undalov // Cifra. Khimiya [Cifra. Chemistry]. — 2025. — № 1 (4). — DOI: 10.60797/CHEM.2025.4.2. [in Russian]
14. Undalov Yu.K. Prognozirovaniye formul mnogokomponentnykh khimicheskikh soedineniy: trekhkomponentnye sistemy, formirovaniye gomologicheskikh seriy soedineniy [Prediction of formulas of multicomponent chemical compounds: three-component systems, formation of homologous series of compounds] / Yu.K. Undalov // Zhurnal neorganicheskoy khimii [Russian Journal of Inorganic Chemistry]. — 1998. — Vol. 43. — № 9. — P. 1561–1564. [in Russian]
15. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds:  $(Li^+ - Ti^{4+} - O^{2-})$ ,  $(Na^+ - Ti^{4+} - O^{2-})$ ,  $(K^+ - V^{5+} - O^{2-})$ ,  $(Ba^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-})$  and four-component systems  $\{Li^+ - Fe^{2+} - (PO_4)^{3-}\}$  / Yu.K. Undalov, E.I. Terukov, D.V. Agafonov [et al.] //



Izvestia of St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University). — 2021. — Vol. 59. — № 85. — P. 26–36. — DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-26-36.

16. Undalov Yu.K. Homologous Series of Chemical Compounds in Three-component Systems ( $A^{a+} - B^{b+} - C^{c-}$ ) and ( $Zn^{2+} - Ge^{4+} - P^{3-}$ ) in Generalized Form / Yu.K. Undalov // *IgMin Research*. — 2023. — Vol. 1. — № 1. — P. 60–69. — DOI: 10.61927/igmin117.

17. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): five-component systems ( $A^{a+} - F^{f+} - [B_{rd}D_{wb}]^{(r+w)bd+} - C^{c-}$ ) and ( $Li^{+} - Fe^{4+} - [Sr_3La_2]^{12+} - O^{2-}$ ) / Yu.K. Undalov // *Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA : materials of International University Scientific Forum, September 19, 2023*. — Pt. 2. — P. 110–125. — DOI: 10.34660/inf.2023.53.27.230.

18. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds of ( $Li^{+} - Ni^{3+} - Mn^{3+} - O^{2-}$ ) system / Yu.K. Undalov, E.I. Terukov, D.S.V. Agafonov [et al.] // *Proceedings of St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. — 2023. — Vol. 60. — № 86. — P. 11–17. — DOI: 10.36807/1998-9849-2022-60-86-11-17.

19. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds in the systems ( $A^{a+} - F^{f+} - [B_{rd}D_{wb}]^{(r+w)bd+} - C^{c-}$ ) and ( $Bi^{3+} - Cu^{2+} - [SrCa]^{4+} - O^{2-}$ ) in generalized form / Yu.K. Undalov // *Cifra. Chemistry*. — 2024. — Vol. 1. — № 1. — DOI: <https://doi.org/10.18454/CHEM.2024.1.3>.

20. Undalov Yu.K. Calculation of homologous series of chemical compounds of system ( $La^{3+} - Sr^{2+} - Ti^{4+} - O^{2-}$ ), ( $Li^{+} - Sr^{2+} - La^{3+} - Fe^{4+} - O^{2-}$ ) / Yu.K. Undalov // *Science. Education. Practice : proceedings of the International Science Conference, March 26, 2025, Delhi, India*. — Pt. 2. — P. 137–146. — DOI: 10.34659/INF.2025.23.47.055.

21. Undalov Yu.K. Raschet gomologicheskikh seriy khimicheskikh soedineniy sistem  $\{Li^{+} - Fe^{2+} - (PO_4)^{3-}\}$ ,  $\{La^{3+} - Sr^{2+} - Ti^{4+} - O^{2-}\}$ ,  $\{Bi^{3+} - Sr^{2+} - Ca^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-}\}$  [Calculation of homologous series of chemical compounds of systems  $\{Li^{+} - Fe^{2+} - (PO_4)^{3-}\}$ ,  $\{La^{3+} - Sr^{2+} - Ti^{4+} - O^{2-}\}$ ,  $\{Bi^{3+} - Sr^{2+} - Ca^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-}\}$ ] / Yu.K. Undalov // *Cifra. Khimiya [Cifra. Chemistry]*. — 2025. — Vol. 2. — № 5. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.5.2. [in Russian]

22. Undalov Yu.K. Gomologicheskie serii khimicheskikh soedineniy sistemy ( $Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$ ) na baze soedineniya  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$  [Homologous series of chemical compounds of the system ( $Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$ ) based on the compound  $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$ ] / Yu.K. Undalov // *Cifra. Khimiya [Cifra. Chemistry]*. — 2025. — Vol. 3. — № 6. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.6.2. [in Russian]

23. Undalov Yu.K. Formirovanie gomologicheskikh seriy khimicheskikh soedineniy v sistemakh ( $Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$ ), ( $Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-}$ ) i ( $Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-}$ ) na baze soedineniy  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20}$ ,  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{10}$  i  $Ca_2Ir^{4+}O_4$  [Formation of homologous series of chemical compounds in the systems ( $Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$ ), ( $Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-}$ ) and ( $Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-}$ ) based on the compounds  $Ir^{4+}_5Ir^{5+}_4O_{20}$ ,  $Ca_5Ir^{5+}_2O_{10}$  and  $Ca_2Ir^{4+}O_4$ ] / Yu.K. Undalov // *Cifra. Khimiya [Cifra. Chemistry]*. — 2025. — Vol. 4. — № 7. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.7.3. [in Russian]

24. Clearfield A. Preparation, structure, and ion-exchange properties of  $Na_4Ti_9O_{20} \cdot xH_2O$  / A. Clearfield, J. Lehto // *Journal of Solid State Chemistry*. — 1988. — Vol. 73. — № 1. — P. 98–106. — DOI: 10.1016/0022-4596(88)90059-X.

25. Chunyan Wang. Recent advances in iridium-based catalysts with different dimensions for the acidic oxygen evolution reaction / Chunyan Wang, Fulin Yang, Ligang Feng // *Nanoscale Horizons*. — 2023. — Vol. 8. — P. 1174–1193. — DOI: 10.1039/D3NH00156C.

26. Wakeshina M. Electrical and magnetic properties of pseudo-one-dimension calcium iridium oxide  $Ca_5Ir_3O_{12}$  / M. Wakeshina, N. Taira, Y. Hinatsu [et al.] // *Solid State Communications*. — 2003. — Vol. 125. — № 6. — P. 311–315. — DOI: 10.1016/s0038-1098(02)00823-2.

27. Bozal-Ginesta C. Spectroelectrochemistry of water oxidation kinetics in molecular versus heterogeneous oxide iridium electrocatalysts / C. Bozal-Ginesta, R.R. Rao, C.A. Mesa [et al.] // *Journal of the American Chemical Society*. — 2022. — Vol. 144. — № 19. — P. 8454–8459. — DOI: 10.1021/jacs.2c02006.

28. Burnett D.L. Exploiting the flexibility of the pyrochlore composition for acid-resilient iridium oxide electrocatalysts in proton exchange membranes / D.L. Burnett, T. Petrucco, R.J. Kashtiban [et al.] // *Journal of Materials Chemistry A*. — 2021. — Vol. 9. — № 44. — P. 25114–25125. — DOI: 10.1039/D1TA05457K.

29. Sarkozy R.F. The characterization of calcium iridium oxides / R.F. Sarkozy, C.W. Moeller, B.L. Chamberland // *Journal of Solid State Chemistry*. — 1974. — Vol. 9. — № 3. — P. 242–246. — DOI: 10.1016/0022-4596(74)90080-2.

30. Keawprak N. Thermoelectric properties of Ca–Ir–O compounds prepared by spark plasma sintering / N. Keawprak, R. Tu, T. Goto // *Materials Transactions*. — 2009. — Vol. 50. — № 4. — P. 853–858. — DOI: 10.2320/matertrans.MRA2008377.