

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.6.2>ГОМОЛОГИЧЕСКИЕ СЕРИИ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ СИСТЕМЫ ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) НА БАЗЕ СОЕДИНЕНИЯ  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ 

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 способ расчета формул гомологических серий химических соединений четырехкомпонентной системы ионов ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) на базе соединения  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$  – известного катализатора. Для системы ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) рассчитано три гомологических серии для направлений развития в сторону  $\text{CaO}$ ,  $\text{IrO}_2$  и  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ :  $\text{Ca}_{7n-2}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{7n+5}$ ,  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_{5n-4}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10n+2}$ ,  $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14n-4}\text{O}_{35n+25}$ . Полученные формулы гомологических серий химических соединений позволяют определить формулы новых четырехкомпонентных соединений, каталитические свойства которых будут отличаться от уже известного  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$  в лучшую сторону. С точки зрения экономии дорогостоящего иридия заслуживает внимания формула гомологической серии  $\text{Ca}_{7n-2}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{7n+5}$ , которая развивается в сторону  $\text{CaO}$ .

**Ключевые слова:** иридий, гомологические серии, химические соединения, заряженные кластеры, ионы химических элементов, способ расчета, катализаторы.

HOMOLOGOUS SERIES OF CHEMICAL COMPOUNDS IN THE ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) SYSTEM BASED ON THE COMPOUND  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ 

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**

This paper presents, for the first time, a method for calculating the formulas of homologous series of chemical compounds in the four-component ion system ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) based on the compound  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ , a well-known catalyst. For the ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) system, three homologous series were calculated for the directions of development towards  $\text{CaO}$ ,  $\text{IrO}_2$  and  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ :  $\text{Ca}_{7n-2}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{7n+5}$ ,  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_{5n-4}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10n+2}$ ,  $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14n-4}\text{O}_{35n+25}$ . The obtained formulas of homologous series of chemical compounds make it possible to determine the formulas of new four-component compounds, which are expected to exhibit catalytic properties superior to those of the known compound  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$  for the better. From the point of view of saving expensive iridium, the formula of the homologous series  $\text{Ca}_{7n-2}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{7n+5}$  deserves attention, which is developing towards  $\text{CaO}$ .

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

**Введение**

Известно, что металлы платиновой группы, включая иридий, обладают уникальными свойствами. Так, окислы иридия  $\text{IrO}_2$ ,  $\text{CaIr}^{4+}\text{O}_3$ ,  $\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4$ ,  $\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}\text{O}_6$  обладают полупроводниковыми свойствами с относительно хорошей стабильностью теплопроводности от температуры [1]. Новое семейство электрокатализаторов в виде окисла пирохлора иридия  $(\text{Na}, \text{Ca})_{2-x}(\text{Ir}_{2-y}\text{M}_y)\text{O}_6$ , где  $(\text{M} = \text{Sb}, \text{Zr}, \text{Ru}, \text{Rh})$ , в частности, соединение  $\text{Ca}_{2-x}\text{Ir}_2\text{O}_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  проявляет высокую электрокаталитическую активность для выделения кислорода в водных сильно кислотных условиях при  $\sim 80$  °C с сохранением стабильности структуры [2], [3]. Авторы работ [4], [5] обнаружили в кристаллической решетке химического соединения (ХС)  $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$  присутствие ионов  $\text{Ir}^{4+}$  и  $\text{Ir}^{5+}$  в соотношении  $1/2$ . Следуя работам [4], [5] и соблюдая электронейтральность формулы соединения  $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$  правильно записать так:  $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12} \equiv \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ . По этой причине, при поиске новых соединений в системе (кальций-иридий-кислород), которой принадлежит соединение  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ , с помощью формул гомологических серий (ГС) химических соединений, необходимо эту систему химических элементов (ХЭ) представлять как четырехкомпонентную систему ионов ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) в виде треугольной пирамиды [6]. Ранее в работах [6], [7] представлен способ расчета формул ГС четырехкомпонентных систем ионов ХЭ в обобщенном виде ( $\text{A}^{a+} - \text{B}^{b+} - \text{D}^{d+} - \text{C}^{c-}$ ).

Основы разработанного в исследованиях [8], [9], [10] способа расчета формул ГС заключаются в следующем:

1. При расчете рассматриваются все возможные последовательно протекающие реакции химического взаимодействия элементарных и более сложных химических компонент системы, начиная со взаимодействия катионов между собой и катионов с анионом. Геометрические особенности фигур, треугольника и треугольной пирамиды, представляющих систему ионов, позволяют из всего набора реакций выделить те, которые принадлежат одной и той же ГС, что описывается определенной формулой.

2. В системах, представленных треугольником или треугольной пирамидой, химическое взаимодействие двух каких-либо химических реагентов изображается отрезком прямой. Продукты этой реакции также находятся на том же

отрезке. Следовательно, если в этих геометрических фигурах пересекаются несколько отрезков, представляющих разные пары реагентов, то можно заключить, что в точке пересечения находится общее для этих пар реагентов новое более сложное по сравнению с реагентами ХС или заряженный кластер (**ЗК**). Причем формула кластера, находящегося в точке пересечения этих отрезков, однозначно определяется всеми уравнениями реакций, которые соответствуют всем пересекающимися отрезкам. Из этого также следует, что все ХС и ЗК рассматриваемой системы ионов ХЭ, располагаются только в точках пересечения отрезков, представляющих взаимодействия различных пар реагентов.

3. В формировании ГС участвуют следующие реакции химического взаимодействия:  $3K_n + C^c \rightarrow XC_n$ , и  $(ЧХС_n + \text{положительно заряженный ион ХЭ} \rightarrow ЧЗК_{n+1})$ , где **ЧХС** и **ЧЗК** – четырехкомпонентные ХС и ЗК, соответственно,  $n \geq 1$ .

4. Любое  $XC_n$  является членом какой-либо ГС с  $n \geq 1$ .

5. Формулы соседних гомологов,  $XC_{n+1}$  и  $XC_n$ , а также  $ЗК_{n+1}$  и  $ЗК_n$ , принадлежащих одной и той же ГС, отличаются на одну и ту же формулу, называемую **гомологической разницей**,  $\Delta$ :  $(XC_{n+1} - XC_n = \Delta)$ , а также  $(ЗК_{n+1} - ЗК_n = \Delta)$ .

6. Тогда  $(XC_n = XC_{n-1} + k \cdot \Delta)$  и  $(ЗК_n = ЗК_{n-1} + k \cdot \Delta)$ , где  $k \geq 0$ ,  $k$  – целые числа.

7. При расчете формулы ГС, которой принадлежит какое-либо известное ХС, называемое **базовым кластером**,  $(XC_{n(bas)})$ , используется выражение  $(XC_{n-1} = XC_{n(bas)} - k_{bas} \cdot \Delta)$ . Причем, для базового кластера  $(n_{bas} = k_{bas} + 1)$  и для любого гомолога  $(n = k + 1)$ . Тогда формула ГС, соответствующая формуле любого гомолога  $XC_n$ , выглядит так:  $(XC_n = XC_{n(bas)} + (n - 1 - k_{bas}) \cdot \Delta)$ .

8. В работах [12], [13] показано, что ГС в четырех- и пятикомпонентных системах могут развиваться только в сторону двухкомпонентных ХС (**ДХС**), а в сторону трехкомпонентных ХС (**ТХС**) – не могут развиваться.

9. В работах [14], [15] показано, что расположение гомологов  $XC_{n-1}$  и  $XC_{n+1}$ , а также гомологов  $ЗК_{n-1}$  и  $ЗК_{n+1}$  разделено кластерами, формулы которых определяются точками пересечения отрезков, ограниченных компонентами системы, где формируется рассматриваемая ГС.

Очевидно, что экспериментально термодинамически и кристаллохимически определить законы формирования ГС химических соединений невозможно. Однако, как показано в работах [11], [12], если использовать геометрические особенности треугольника и треугольной пирамиды для представления системы ионов ХЭ, то при рассмотрении всех возможных химических взаимодействий компонентов системы удастся выявить те реакции, которые участвуют в формировании ГС.

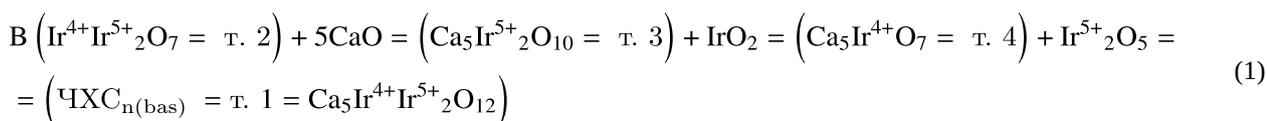
Как указано в работах [6], [7], надежная экспериментальная проверка достоверности способа расчета ГС многокомпонентных систем в литературе отсутствуют (так как это финансово затратное мероприятие). Однако при использовании разработанного в [8], [10] способ расчета формул ГС была получена формула ГС  $(M^+_4 Ti^{4+}_{n+1} O^{2-}_{2(n+2)})$  для следующих конкретных систем ионов ХЭ:  $(M^+ - Ti^{4+} - O^{2-})$ , где  $M^+ \equiv Li^+, K^+, Na^+$ . Причем формула ГС  $(M^+_4 Ti^{4+}_{n+1} O^{2-}_{2(n+2)})$  полностью совпадает с формулой, полученной на основе эксперимента [16]. Это говорит о справедливости разработанного в работах [6], [8], [10] принципов расчета формул ГС многокомпонентных систем ионов ХЭ.

*Цель работы:* рассчитать формулы ГС системы  $(Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-})$  на базе четырехкомпонентного соединения  $Ca_5 Ir^{4+} Ir^{5+}_2 O_{12}$ .

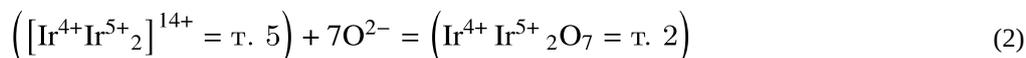
## Основная часть

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

В данной работе кластер  $Ca_5 Ir^{4+} Ir^{5+}_2 O_{12}$  [4], [5] является базовым,  $(ЧХС_{n(bas)} = \text{т. 1} = Ca_5 Ir^{4+} Ir^{5+}_2 O_{12})$ . Образование базового кластера  $(ЧХС_{n(bas)} = \text{т. 1} = Ca_5 Ir^{4+} Ir^{5+}_2 O_{12})$  можно описать следующим образом – рис. 1:



Формулы кластеров в виде т. 5, т. 6 и т. 7, ограничивающие плоскости (т. 5 –  $Ca^{2+} - O^{2-}$ ), (т. 6 –  $(Ir^{4+} - O^{2-})$ ) и (т. 7 –  $Ir^{5+} - O^{2-}$ ), в которых формируются четырехкомпонентные ГС (**ЧГС**), определяются следующими уравнениями:



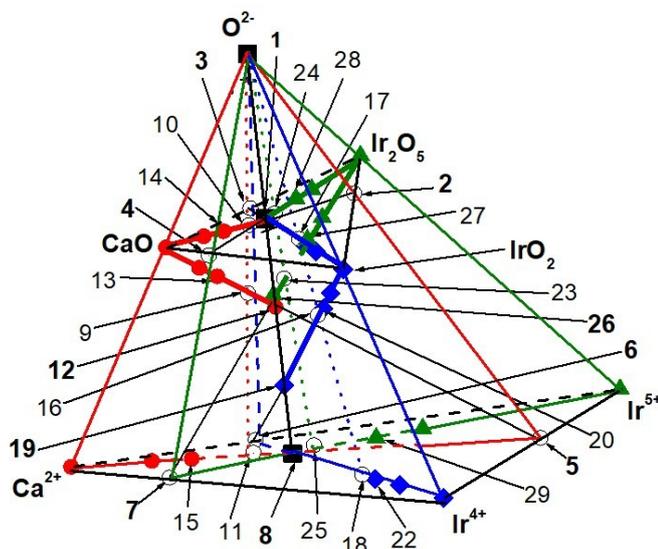
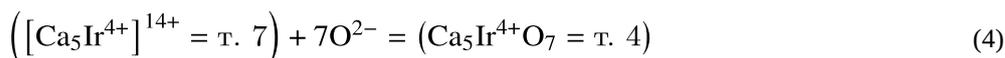
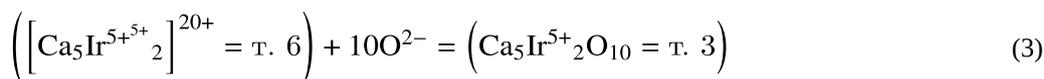
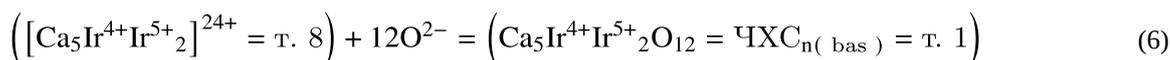
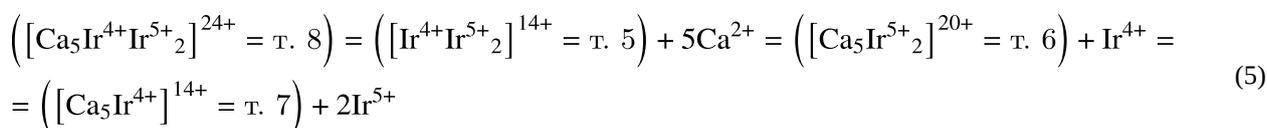


Рисунок 1 - Система (Ca<sup>2+</sup> - Ir<sup>4+</sup> - Ir<sup>5+</sup> - O<sup>2-</sup>)  
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.6.2.1>

- т. 1 = ЧХС<sub>n(bas)</sub> = Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>12</sub>, т. 2 = ЧХС<sub>n(bas)</sub> = Ir<sup>4+</sup><sub>2</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>4</sub>O<sub>14</sub> ≡ Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>10</sub>O<sub>35</sub>,  
 т. 3 = ЧХС<sub>n(bas)=1</sub> = Ca<sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>10</sub>, т. 4 = ТХС<sub>n(bas)</sub> = Ca<sub>10</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>2</sub>O<sub>14</sub>,  
 т. 5 = [Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>]<sup>14+</sup>, т. 6 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>]<sup>20+</sup>, т. 7 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>]<sup>14+</sup>, т. 8 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>]<sup>24+</sup>,  
 т. 9 = [Ca<sub>7</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>7</sub>]<sup>14+</sup>, т. 10 = Ca<sub>7</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>14</sub>, т. 11 = [Ca<sub>7</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>]<sup>28+</sup>,  
 т. 12 = ЧЗК<sub>n(bas)</sub> = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>5</sub>]<sup>14+</sup>, т. 13 = [Ca<sub>12</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>12</sub>]<sup>14+</sup>,  
 т. 14 = Ca<sub>12</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>19</sub>, т. 15 = [Ca<sub>12</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>]<sup>38+</sup>, т. 16 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>10</sub>]<sup>20+</sup>,  
 т. 17 = Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>11</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>32</sub>, т. 18 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>11</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>]<sup>42+</sup>, т. 19 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>2</sub>]<sup>20+</sup> = ЧЗК<sub>n(bas)</sub>,  
 т. 20 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>2</sub>]<sup>20+</sup>, т. 21 = Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>6</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>22</sub>, т. 22 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>6</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>]<sup>44+</sup>,  
 т. 23 = [Ca<sub>25</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>14</sub>O<sub>35</sub>]<sup>70+</sup>, т. 24 = Ca<sub>25</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>14</sub>O<sub>70</sub>, т. 25 = [Ca<sub>25</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>14</sub>]<sup>140+</sup>,  
 т. 26 = [Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>5</sub>]<sup>14+</sup>, т. 27 = [Ca<sub>25</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>24</sub>O<sub>60</sub>]<sup>70+</sup>,  
 т. 28 = Ca<sub>25</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>24</sub>O<sub>95</sub>, т. 29 = [Ca<sub>25</sub>Ir<sup>4+</sup><sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>24</sub>]<sup>190+</sup>.

Трехкомпонентные заряженные кластеры в виде т. 5, т. 6 и т. 7, состоящие только из катионов, при взаимодействии друг с другом образуют ЧЗКв в виде т. 8, который взаимодействуя с анионом участвует в образовании базового кластера (ЧХС<sub>n(bas)</sub> = т. 1 = Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>12</sub>) – рис. 1:

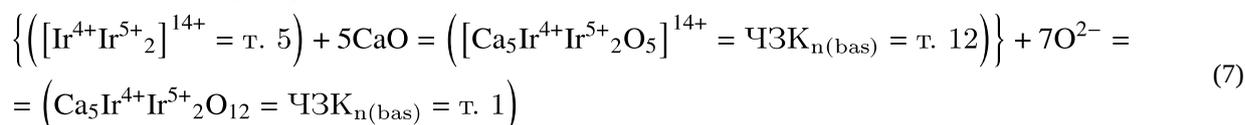


Боковыми гранями треугольной пирамиды, представляющей четырехкомпонентную систему (Ca<sup>2+</sup> - Ir<sup>4+</sup> - Ir<sup>5+</sup> - O<sup>2-</sup>), являются трехкомпонентные системы (Ir<sup>4+</sup> - Ir<sup>5+</sup> - O<sup>2-</sup>), (Ca<sup>2+</sup> - Ir<sup>5+</sup> - O<sup>2-</sup>) и (Ca<sup>2+</sup> - Ir<sup>4+</sup> - O<sup>2-</sup>), которым принадлежат ТХС в виде (Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>7</sub> = т. 2), (Ca<sub>5</sub>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>10</sub> = т. 3) и (Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>O<sub>7</sub> = т. 4), участвовавшие согласно (1) в реакции образования (Ca<sub>5</sub>Ir<sup>4+</sup>Ir<sup>5+</sup><sub>2</sub>O<sub>12</sub> = ЧХС<sub>n(bas)</sub> = т. 1).

Для определения формулы ветви ЧХС в ГС по формуле (ЧХС<sub>n</sub> = ЧХС<sub>n(bas)</sub> - k<sub>bas</sub>·Δ) необходимо определить формулу гомологической разницы Δ и значение k<sub>bas</sub>, где (k<sub>bas</sub> ≥ 0) и k<sub>bas</sub> – целые числа.

## 2.2. Подсистема (Ca<sup>2+</sup> - т. 5 - O<sup>2-</sup>). Направление ГС-1 – CaO

Для ГС-1 эта задача будет решена так:



$$\begin{aligned} & \left( \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1} \right) + 7\text{Ca}^{2+} = \left( [\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{14+} = \text{т. 5} \right) + 12\text{CaO} = \\ & = \left( [\text{Ca}_{12}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}]^{14+} = \text{ЧЗК}_{n(\text{bas})+1} = \text{т. 13} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \left( [\text{Ca}_{12}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}]^{14+} = \text{ЧЗК}_{n(\text{bas})+1} = \text{т. 13} \right) + 7\text{O}^{2-} = \left( \text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7 = \text{т. 2} \right) + 12\text{CaO} = \\ & = \left( \text{Ca}_{12}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{19} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1} = \text{т. 14} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\Delta = \left( \text{Ca}_{12}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{19} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1} = \text{т. 14} \right) - \left( \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1} \right) = \text{Ca}_7\text{O}_7 \quad (10)$$

Так как ( $k_{(\text{bas})} \geq 0$ ), ( $\text{ЧХС}_{n=1} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} - k_{(\text{bas})} \cdot \Delta$ ) и ( $n_{(\text{bas})} = k_{(\text{bas})} + 1$ ), то выясняется, что при определении  $\text{ЧХС}_{n=1}$ , вычитать формулу ( $\Delta = \text{Ca}_7\text{O}_7$ ) из формулы ( $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1}$ ) нельзя. Следовательно,  $k_{(\text{bas})} = 0$  и  $n_{(\text{bas})} = 1$ . Тогда получим:

$$\text{Ветвь ХС} - \left( \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1} \right) + (n-1)\text{Ca}_7\text{O}_7 = \text{Ca}_{7n-2}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{7n+5} \quad (11)$$

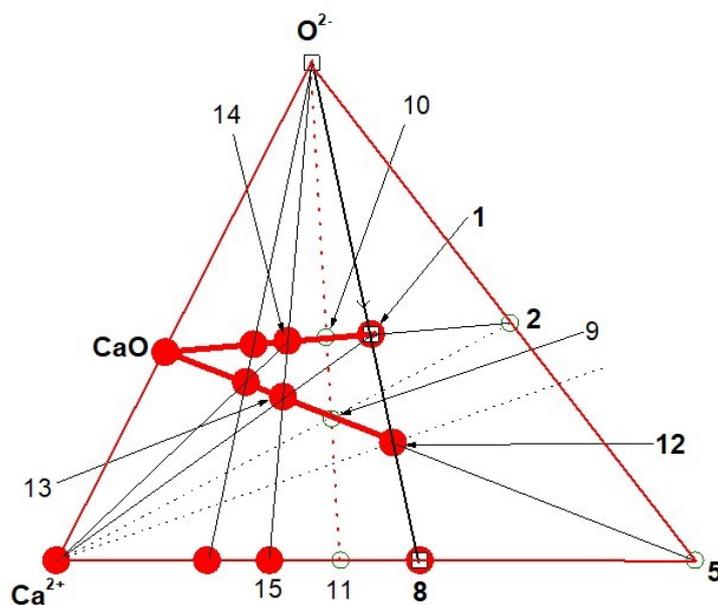


Рисунок 2 - Подсистема ( $\text{Ca}^{2+} - \text{т. 5} - \text{O}^{2-}$ ). Направление ГС-1 – CaO  
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.6.2.2>

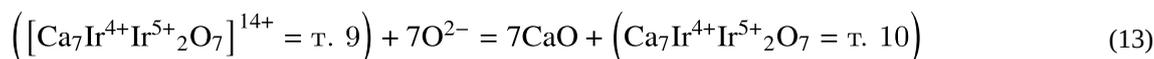
- т. 1 =  $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ , т. 2 =  $\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7$ ,  
 т. 5 =  $([\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{14+})$ , т. 8 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{24+}$ ,  
 т. 9 =  $[\text{Ca}_7\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7]^{14+}$ , т. 10 =  $\text{Ca}_7\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{14}$ ,  
 т. 11 =  $[\text{Ca}_7\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{28+}$ , т. 12 =  $\text{ЧЗК}_{n(\text{bas})} = [\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5]^{14+}$ ,  
 т. 14 =  $[\text{Ca}_{12}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}]^{14+}$ , т. 14 =  $\text{Ca}_{12}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{19}$ , т. 15 =  $[\text{Ca}_{12}\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{38+}$ .

В формуле ( $\text{Ca}_7\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{14} = 7\text{CaO} + \text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7 = \text{т. 10}$ ) отношение  $\text{CaO}/\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7 = 7$ , а в формуле ( $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = 5\text{CaO} + \text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7 = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1}$ ) отношение  $\text{CaO}/\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7 = 5$ . Следовательно, кластер ( $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1}$ ) расположен на отрезке (т. 10 – т. 2), а кластеры  $\text{ЧХС}_{n>1}$  – на отрезке (т. 10 – CaO) – рис. 2.

В формуле ( $[\text{Ca}_7\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7]^{14+} = 7\text{CaO} + [\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{14+} = \text{т. 9}$ ) отношение  $\text{CaO}/[\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{14+} = 7$ , а в формуле ( $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5]^{14+} = 5\text{CaO} + [\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{14+} = \text{ЧЗК}_{n(\text{bas})} = \text{т. 12}$ ) отношение  $\text{CaO}/[\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{14+} = 5$ . Следовательно, кластер ( $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5]^{14+} = \text{ЧЗК}_{n(\text{bas})} = \text{т. 12}$ ) расположен на отрезке (т. 9 – т. 5), а кластеры  $\text{ЧЗК}_{n>1}$  – на отрезке (т. 9 – CaO) – рис. 2.

Кластер в виде т. 9 находится на пересечении отрезков, ( $\text{Ca}^{2+} - \text{т. 2}$ ) и ( $\text{CaO} - \text{т. 5}$ ), а кластер в виде т. 10 – на пересечении отрезков ( $\text{CaO} - \text{т. 2}$ ) и ( $\text{т. 9} - \text{O}^{2-}$ ) – рис. 2:

$$7\text{Ca}^{2+} + \left( \text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7 = \text{т. 2} \right) = \left( [\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{14+} = \text{т. 5} \right) + 7\text{CaO} = \left( [\text{Ca}_7\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7]^{14+} = \text{т. 9} \right) \quad (12)$$



Итак, в системе  $(\text{Ca}^{2+} - \text{т. 5} - \text{O}^{2-})$  кластером, разделяющим  $\text{ЧЗК}_{n=1}$  и  $\text{ЧЗК}_{n>1}$ , оказывается кластер в виде т. 9, а кластером, разделяющими  $\text{ЧХС}_{n=1}$  и  $\text{ЧХС}_{n>1}$  – кластер в виде т. 10 – рис. 2.

### 2.3. Подсистема $(\text{Ir}^{4+} - \text{т. 6} - \text{O}^{2-})$ . Направление ГС-2 – $\text{IrO}_2$

Для ГС-2 эта задача будет решена так:

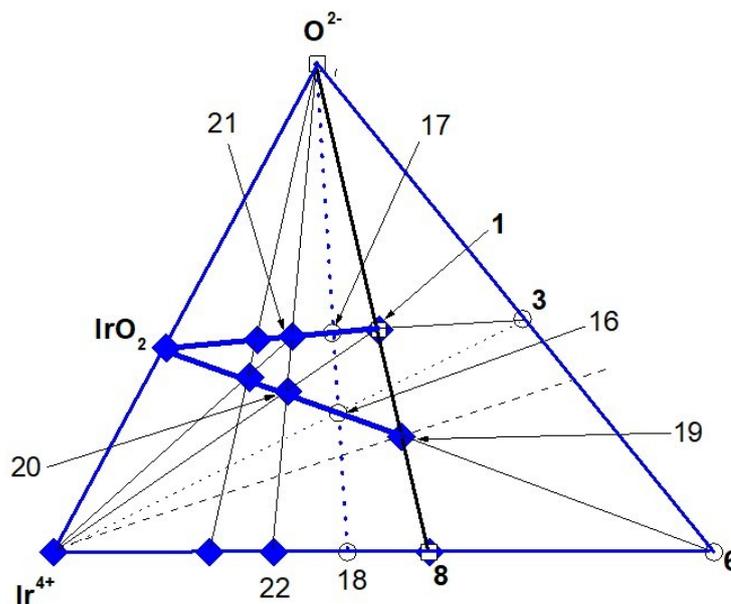
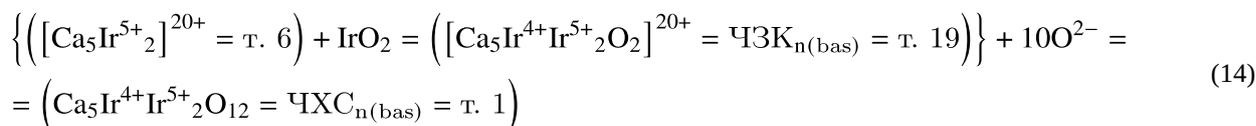
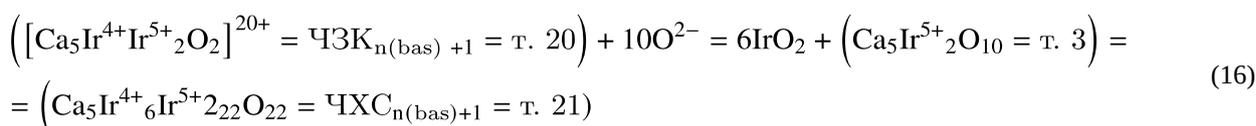
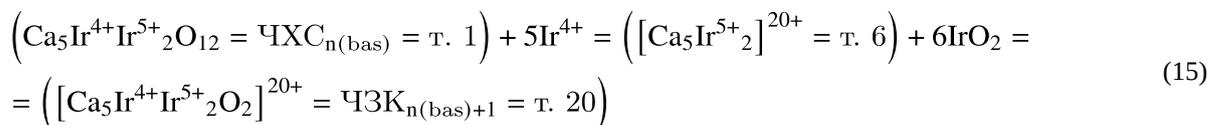
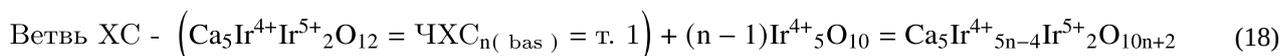


Рисунок 3 - Подсистема  $(\text{Ir}^{4+} - \text{т. 6} - \text{O}^{2-})$ . Направление ГС-2 –  $\text{IrO}_2$   
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.6.2.3>

- т. 1 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})}$ , т. 3 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}$ ,
- т. 6 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2]^{20+}$ , т. 8 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{24+}$ ,
- т. 16 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}]^{20+}$ , т. 17 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{20}$ ,
- т. 18 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_{11}\text{Ir}^{5+}_2]^{42+}$ , т. 19 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_2]^{20+} = \text{ЧЗК}_{n(\text{bas})}$ ,
- т. 20 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_2]^{20+}$ , т. 21 =  $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_6\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{22}$ , т. 22 =  $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_6\text{Ir}^{5+}_2]^{44+}$ .

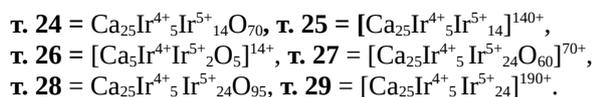


Так как  $(k_{(\text{bas})} \geq 0)$ ,  $(\text{ТХС}_{n=1} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})} - k_{(\text{bas})} \cdot \Delta)$  и  $(n_{(\text{bas})} = k_{(\text{bas})} + 1)$ , то выясняется, что при определении  $\text{ТХС}_{n=1}$ , вычитать формулу  $(\Delta = \text{Ir}^{4+}_5\text{O}_{10})$  из формулы  $(\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1})$  нельзя. Следовательно,  $k_{(\text{bas})} = 0$  и  $n_{(\text{bas})} = 1$ . Тогда получим:



В формуле  $(\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{20} = 5\text{IrO}_2 + \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{т. 17})$  отношение  $\text{IrO}_2 / \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = 5$ , а в формуле  $(\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{IrO}_2 + \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1})$  отношение  $\text{IrO}_2 / \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = 1$ . Следовательно, кластер  $(\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1})$  расположен на отрезке  $(\text{т. 17} - \text{т. 3})$ , а в кластеры  $\text{ЧХС}_{n>1}$  – на отрезке  $(\text{т. 17} - \text{IrO}_2)$  – рис. 3.





Так как ( $k_{(\text{bas})} \geq 0$ ), ( $\text{ТХС}_{n=1} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})} - k_{(\text{bas})} \cdot \Delta$ ) и ( $n_{(\text{bas})} = k_{(\text{bas})} + 1$ ), то выясняется, что при определении  $\text{ТХС}_{n=1}$ , вычитать формулу ( $\Delta = \text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{35}$ ) из формулы ( $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{10}\text{O}_{60} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1}$ ) нельзя. Следовательно,  $k_{(\text{bas})} = 0$  и  $n_{(\text{bas})} = 1$ . Тогда получим:

$$\text{Ветвь ХС} - \left( \text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{10}\text{O}_{60} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1} \right) + (n-1)\text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{35}. \quad (25)$$

В формуле ( $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{70} = 7\text{Ir}_2\text{O}_5 + 5\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{O}_7 = \text{т. 24}$ ) отношение  $\text{Ir}_2\text{O}_5/\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{O}_7 = 7/5$ , а в формуле ( $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{10}\text{O}_{60} \equiv \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = 5\text{Ir}_2\text{O}_5 + 5\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{O}_7 = \text{ТХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 1}$ ) отношение  $\text{Ir}_2\text{O}_5/\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{O}_7 = 1$ . Следовательно, кластер ( $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{10}\text{O}_{60} \equiv \text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 1}$ ) расположен на отрезке (т. 24 – т. 4) – рис. 4.

В формуле ( $[\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{35}]^{70+} = 7\text{Ir}_2\text{O}_5 + 5[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}]^{14+} = \text{т. 23}$ ) отношение  $\text{Ir}_2\text{O}_5/[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}]^{14+} = 7/5$ , а в формуле ( $[\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{10}\text{O}_{25}]^{70+} = 5\text{Ir}_2\text{O}_5 + 5[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}]^{14+} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})} = \text{т. 23}$ ) отношение  $\text{Ir}_2\text{O}_5/[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}]^{14+} = 1$ . Следовательно, кластер ( $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5]^{14+} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 26}$ ) расположен на отрезке (т. 23 – т. 7), а кластеры  $\text{ТХС}_{n>1}$  – на отрезке (т. 23 –  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ ) – рис. 4.

Кластер в виде т. 23 находится на пересечении отрезков, ( $\text{Ir}^{5+} - \text{т. 4}$ ) и ( $\text{Ir}_2\text{O}_5 - \text{т. 7}$ ), а кластер в виде т. 24 – на пересечении отрезков ( $\text{Ir}_2\text{O}_5 - \text{т. 4}$ ) и ( $\text{т. 23} - \text{O}^{2-}$ ) – рис. 4:

$$14\text{Ir}^{5+} + 5(\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{O}_7 = \text{т. 4}) = 5([\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}]^{14+} = \text{т. 7}) + 7\text{Ir}_2\text{O}_5 = ([\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{35}]^{70+} = \text{т. 23}) \quad (26)$$

$$\begin{aligned} &([\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{35}]^{70+} = \text{т. 23}) + 35\text{O}^{2-} = 7\text{Ir}_2\text{O}_5 + 5(\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{O}_7 = \text{т. 4}) = \\ &= (\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{70} = \text{т. 24}) \end{aligned} \quad (27)$$

Итак, в системе ( $\text{Ir}^{5+} - \text{т. 7} - \text{O}^{2-}$ ) кластером, разделяющим  $\text{ТХС}_{n=1}$  и  $\text{ТХС}_{n>1}$ , оказывается кластер в виде т. 23, а кластером, разделяющими  $\text{ТХС}_{n=1}$  и  $\text{ТХС}_{n>1}$  – кластер в виде т. 24 – рис. 4.

### Заключение

Закономерное обогащение гомологов одной и той же ГС двухкомпонентным ХС при неизменности гомологической разницы  $\Delta$  для данной ГС должно привести к закономерному изменению кристаллической решетки ее членов. В совокупности все это должно привести к закономерному изменению фундаментальных характеристик ХС-гомологов этой ГС. Примером работоспособности разработанного в [6], [8], [10] способа расчета формул ГС является совпадение формулы ГС ( $\text{M}^+\text{Ti}^{4+}_{n+1}\text{O}^{2-}_{2(n+2)}$ ) системы ( $\text{M}^+\text{-Ti}^{4+}\text{-O}^{2-}$ ), где  $\text{M}^+ \equiv \text{Li}^+, \text{K}^+, \text{Na}^+$ , полученной расчетом в [10] и экспериментально в [16]

Формулы четырехкомпонентных ГС системы ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ) получены с помощью упрощенного способа расчета. Развитие рассчитанных ГС происходит в трех направлениях: в сторону  $\text{CaO}$ ,  $\text{IrO}_2$  и  $\text{Ir}_2\text{O}_5$ . Гомологические серии формируются в подсистемах ( $\text{Ca}^{2+} - [\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2]^{14+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Ir}^{4+} - [\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2]^{10+} - \text{O}^{2-}$ ) и ( $\text{Ir}^{5+} - [\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}]^{14+} - \text{O}^{2-}$ ). Как выяснилось, в системе ( $\text{A}^+ - \text{B}^+ - \text{D}^+ - \text{C}^-$ ) вообще, и в системе ( $\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ), в частности, всем подсистемам, где формируются трех- и четырехкомпонентные ГС, характерно раздельное расположение кластеров с  $n=1$  и  $n>1$ . Во всех трех выше указанных подсистемах кластеры  $\text{ТХС}_{n=1}$  и  $\text{ТХС}_{n>1}$  разделены так, что  $\text{ТХС}_{n=1}$  находятся на отрезках ( $\text{Ca}_7\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{14} - \text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7$ ), ( $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{20} - \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}$ ) и ( $\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{70} - \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}$ ), соответственно. При этом, кластеры  $\text{ТХС}_{n=1}$  и  $\text{ТХС}_{n>1}$  также разделены так, что  $\text{ТХС}_{n=1}$  находятся на отрезках ( $\text{CaO} - [\text{Ca}_7\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_7]^{14+}$ ), ( $\text{IrO}_2 - [\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}]^{20+}$ ) и ( $\text{Ir}_2\text{O}_5 - [\text{Ca}_{25}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{14}\text{O}_{25}]^{70+}$ ), соответственно.

Согласно пункту 3 во Введении, если  $n=1$ , то продолжение отрезка (положительно заряженный ион ХЭ –  $\text{ТХС}_{n=1}$ ) не пересекается с отрезком, на котором располагаются все  $\text{ТХС}_{n \geq 1}$ .

### 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. 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.
2. 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.] // J. Mater. Chem. A. — 2021. — Vol. 9. — № 44. — P. 25114–25125. — DOI: 10.1039/D1TA05457K.
3. Sarkozy R.F. The characterization of calcium iridium oxides / R.F. Sarkozy, C.W. Moeller, B.L. Chamberland // J. Solid State Chem. — 1974. — Vol. 9. — № 3. — P. 242–246. — DOI: 10.1016/0022-4596(74)90080-2.

4. Wakeshina M. Electrical and magnetic properties of pseudo-one-dimension calcium iridium oxide  $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$  / 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.
5. 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.
6. Ундалов Ю.К. Гомологические серии химических соединений системы  $(\text{Li}^+ - \text{Ni}^{3+} - \text{Mn}^{3+} - \text{O}^{2-})$  system / Ю.К. Ундалов, Е.И. Теруков, Д.В. Агафонов [и др.] // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. — 2022. — № 60 (86). — С. 11–17. — DOI: 10.36807/1998-9849-2022-60-86-11-17.
7. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): four-component systems  $(\text{A}^{a+} - \text{B}^{b+} - \text{D}^{d+} - \text{C}^{c-})$  and  $(\text{La}^{3+} - \text{Ni}^{2+} - \text{Ni}^{3+} - \text{O}^{2-})$  / Yu.K. Undalov // *Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA. Materials of International University Scientific Forum*. September 19. — 2023. — P. 93–109. — DOI: 10.34660/inf.2023.32.28.229.
8. Undalov Yu.K. Forecasting formulas for multinary chemical compounds: ternary systems; homologous series of compounds / Yu.K. Undalov // *Russian J. Inorganic Chemistry*. — 1998. — Vol. 43. — № 9. — P. 1447–1450.
9. Ундалов Ю. К. Гомологические серии химических соединений: трех компонентные системы  $(\text{Li}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$ ,  $(\text{Na}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$ ,  $(\text{K}^+ - \text{V}^{5+} - \text{O}^{2-})$ ,  $(\text{Ba}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-})$  и четырех компонентная система  $\{\text{Li}^+ - \text{Fe}^{2+} - (\text{PO}_4)^{3-}\}$  / Ю. К. Ундалов, Е. И. Теруков, Д.В. Агафонов, А. В. Бобыль [и др.] // *Известия СПбГТИ (ТУ)*. — 2021. — № 59 (85). — С. 26–36. — DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-26-36.
10. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): three-component systems  $(\text{A}^{a+} - \text{B}^{b+} - \text{C}^{c-})$  and  $(\text{Na}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$ ,  $(\text{Li}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$ ,  $(\text{K}^+ - \text{V}^{5+} - \text{O}^{2-})$ ,  $(\text{Ba}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-})$  / Yu.K. Undalov // *Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA. Materials of International University Scientific Forum*. September 19. — 2023. — P. 73–92. — DOI: 10.34660/INF.2023.39.95.228.
11. Ундалов Ю.К. Гомологические серии химических соединений в трехкомпонентных системах  $(\text{A}^{a+} - \text{B}^{b+} - \text{C}^{c-})$  и  $(\text{Zn}^{2+} - \text{Ge}^{4+} - \text{P}^{3-})$  в обобщенном виде / Ю.К. Ундалов // *Cifra. Химия*. — 2024. — № 1 (1). — С. 1–14. — DOI: 10.18454/CHEM.2024.1.1.
12. Undalov Yu.K. On the question of the direction of development of homologous series of chemical compounds / Yu.K. Undalov // *Proceedings of the International Science Conference "Science. Education. Practice"*. — 2024. — Part 1. — P. 58–74.
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). — С. 1–15. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.4.2.
14. Undalov Yu.K. Calculation of homologous series of chemical compounds of system  $(\text{La}^{3+} - \text{Sr}^{2+} - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$ ,  $(\text{Li}^+ - \text{Sr}^{2+} - \text{La}^{3+} - \text{Fe}^{4+} - \text{O}^{2-})$  / Yu.K. Undalov // *Proceedings of the International Science Conference "Science. Education. Practice"*. — 2025. — Part 2. — P. 137–146. — DOI: 10.34659/INF.2025.23.47.055.
15. Ундалов Ю.К. Расчет гомологических серий химических соединений систем  $\{\text{Li}^+ - \text{Fe}^{2+} - (\text{PO}_4)^{3-}\}$ ,  $(\text{La}^{3+} - \text{Sr}^{2+} - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$ ,  $(\text{Bi}^{3+} - \text{Sr}^{2+} - \text{Ca}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-})$  / Ю.К. Ундалов // *Cifra. Химия*. — 2025. — № 2 (5). — С. 1–11. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.5.2.

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

1. 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.
2. 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. Kashitiban [et al.] // *J. Mater. Chem. A*. — 2021. — Vol. 9. — № 44. — P. 25114–25125. — DOI: 10.1039/D1TA05457K.
3. Sarkozy R.F. The characterization of calcium iridium oxides / R.F. Sarkozy, C.W. Moeller, B.L. Chamberland // *J. Solid State Chem*. — 1974. — Vol. 9. — № 3. — P. 242–246. — DOI: 10.1016/0022-4596(74)90080-2.
4. Wakeshina M. Electrical and magnetic properties of pseudo-one-dimension calcium iridium oxide  $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$  / 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.
5. 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.
6. Undalov Yu.K. Gomologicheskie serii himicheskikh soedinenij sistemy  $(\text{Li}^+ - \text{Ni}^{3+} - \text{Mn}^{3+} - \text{O}^{2-})$  [Homologous series of chemical compounds of  $(\text{Li}^+ - \text{Ni}^{3+} - \text{Mn}^{3+} - \text{O}^{2-})$  system] / Yu.K. Undalov, E.I. Terukov, D.V. Agafonov [et al.] // *Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Izvestia of St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University)]. — 2022. — № 60 (86). — P. 11–17. — DOI: 10.36807/1998-9849-2022-60-86-11-17. [in Russian]
7. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): four-component systems  $(\text{A}^{a+} - \text{B}^{b+} - \text{D}^{d+} - \text{C}^{c-})$  and  $(\text{La}^{3+} - \text{Ni}^{2+} - \text{Ni}^{3+} - \text{O}^{2-})$  / Yu.K. Undalov // *Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA. Materials of International University Scientific Forum*. September 19. — 2023. — P. 93–109. — DOI: 10.34660/inf.2023.32.28.229.
8. Undalov Yu.K. Forecasting formulas for multinary chemical compounds: ternary systems; homologous series of compounds / Yu.K. Undalov // *Russian J. Inorganic Chemistry*. — 1998. — Vol. 43. — № 9. — P. 1447–1450.

9. Undalov Yu. K. Gomologicheskie serii himicheskikh soedinenij: trekh komponentnye sistemy ( $\text{Li}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Na}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{K}^+ - \text{V}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Ba}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-}$ ) i chetyrekh komponentnaya sistema  $\{\text{Li}^+ - \text{Fe}^{2+} - (\text{PO}_4)^{3-}\}$  [Homologous Compounds: Three-component Systems ( $\text{Li}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Na}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{K}^+ - \text{V}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Ba}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-}$ ) and a Four-component System  $\{\text{Li}^+ - \text{Fe}^{2+} - (\text{PO}_4)^{3-}\}$ ] / Yu. K. Undalov, E. I. Terukov, D.V. Agafonov [et al.] // Izvestiya SPbGTI (TU) [Izvestia of St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University)]. — 2021. — № 59 (85). — P. 26–36. — DOI: 10.36807/1998-9849-2021-59-85-26-36. [in Russian]
10. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): three-component systems ( $\text{A}^+ - \text{B}^+ - \text{C}^-$ ) and ( $\text{Na}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Li}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{K}^+ - \text{V}^{5+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Ba}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-}$ ) / Yu.K. Undalov // Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA. Materials of International University Scientific Forum. September 19. — 2023. — P. 73–92. — DOI: 10.34660/INF.2023.39.95.228.
11. Undalov Yu.K. Gomologicheskie serii himicheskikh soedinenij v trehkomponentnyh sistemah ( $\text{A}^+ - \text{B}^+ - \text{C}^-$ ) i ( $\text{Zn}^{2+} - \text{Ge}^{4+} - \text{P}^{3-}$ ) v obobshhennom vide [Homological series of chemical compounds in three-component systems  $\text{A}^+ - \text{B}^+ - \text{C}^-$ ) and ( $\text{Zn}^{2+} - \text{Ge}^{4+} - \text{P}^{3-}$ ) in generalized form] / Yu.K. Undalov // Cifra. Himija [Cifra. Chemistry]. — 2024. — № 1 (1). — P. 1-14. — DOI: 10.18454/CHEM.2024.1.1. [in Russian]
12. Undalov Yu.K. On the question of the direction of development of homologous series of chemical compounds / Yu.K. Undalov // Proceedings of the International Science Conference "Science. Education. Practice". — 2024. — Part 1. — P. 58–74.
13. Undalov Yu.K. O formirovanii gomologicheskikh serij (rjadov) himicheskikh soedinenij v mnogokomponentnyh sistemah ionov himicheskikh soedinenij [On the formation of homological series (rows) of chemical compounds multicomponent systems of chemical elements ions] / Yu.K. Undalov // Cifra. Himija [Cifra. Chemistry]. — 2025. — № 1 (4). — P. 1–15. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.4.2. [in Russian]
14. Undalov Yu.K. Calculation of homologous series of chemical compounds of system ( $\text{La}^{3+} - \text{Sr}^{2+} - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Li}^+ - \text{Sr}^{2+} - \text{La}^{3+} - \text{Fe}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ) / Yu.K. Undalov // Proceedings of the International Science Conference "Science. Education. Practice". — 2025. — Part 2. — P. 137–146. — DOI: 10.34659/INF.2025.23.47.055.
15. Undalov Yu.K. Raschet gomologicheskikh serij himicheskikh soedinenij sistem  $\{\text{Li}^+ - \text{Fe}^{2+} - (\text{PO}_4)^{3-}\}$ , ( $\text{La}^{3+} - \text{Sr}^{2+} - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Bi}^{3+} - \text{Sr}^{2+} - \text{Ca}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-}$ ) [Calculation of homologous series of chemical compounds of systems  $\{\text{Li}^+ - \text{Fe}^{2+} - (\text{PO}_4)^{3-}\}$ , ( $\text{La}^{3+} - \text{Sr}^{2+} - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-}$ ), ( $\text{Bi}^{3+} - \text{Sr}^{2+} - \text{Ca}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-}$ )] / Yu.K. Undalov // Cifra. Himija [Cifra. Chemistry]. — 2025. — № 2 (5). — P. 1–11. — DOI: 10.60797/CHEM.2025.5.2. [in Russian]