

DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.7.3>**ФОРМИРОВАНИЕ ГОМОЛОГИЧЕСКИХ СЕРИЙ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В СИСТЕМАХ (IR⁴⁺ – IR⁵⁺ – O²⁻), (CA²⁺ – IR⁵⁺ – O²⁻) И (CA²⁺ – IR⁴⁺ – O²⁻) НА БАЗЕ СОЕДИНЕНИЙ IR⁴⁺₅IR⁵⁺₄O₂₀, CA₅IR⁵⁺₂O₁₀, И CA₂IR⁴⁺₄O₄**

Научная статья

Ундалов Ю.К.^{1,*}¹ Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Аннотация

В работе представлен упрощенный расчет формул гомологических серий химических соединений трех компонентных систем (Ir⁴⁺ – Ir⁵⁺ – O²⁻), (Ca²⁺ – Ir⁴⁺ – O²⁻) и (Ca²⁺ – Ir⁵⁺ – O²⁻). Формулы полученных расчетом шести гомологических серий имеют следующий вид: Ir⁴⁺_{5n}Ir⁵⁺₄O_{10n+10}, Ir⁴⁺₅Ir⁵⁺_{4n}O_{10n+10}, Ca₂Ir⁴⁺_nO_{2n+2}, Ca_{2n}Ir⁴⁺_nO_{2n+2}, Ca₅Ir⁵⁺_{2n}O_{5n+5} и Ca_{5n}Ir⁵⁺₂O_{5n+5}. Расчет гомологических серий трех компонентных систем произведен на базе соединений Ir⁴⁺₅₄Ir⁵⁺₄O₂₀, Ca₅Ir⁵⁺₂O₁₀ и Ca₂Ir⁴⁺₄O₄, которые участвуют в образовании четырех компонентного соединения Ca₁₀Ir⁴⁺₅Ir⁵⁺₄O₃₀. Рассчитанные формулы гомологических серий потенциально дают возможность улучшить характеристики уже известных трех компонентных катализаторов, например, Ca₂Ir⁴⁺₄O₄, Ca₂Ir⁴⁺₂O₆ и Ca₄Ir⁴⁺₆O₆.

Ключевые слова: гомологические серии, химические соединения, заряженные кластеры, способ расчета, трех компонентные системы, ионы химических элементов, катализаторы.

FORMATION OF HOMOLOGOUS SERIES OF CHEMICAL COMPOUNDS IN (IR⁴⁺ – IR⁵⁺ – O²⁻), (CA²⁺ – IR⁵⁺ – O²⁻) AND (CA²⁺ – IR⁴⁺ – O²⁻) SYSTEMS BASED ON COMPOUNDS IR⁴⁺₅IR⁵⁺₄O₂₀, CA₅IR⁵⁺₂O₁₀ AND CA₂IR⁴⁺₄O₄

Research article

Undalov Y.K.^{1,*}¹ 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 simplified calculation of formulas for homologous series of chemical compounds of three-component systems (Ir⁴⁺ – Ir⁵⁺ – O²⁻), (Ca²⁺ – Ir⁴⁺ – O²⁻) and (Ca²⁺ – Ir⁵⁺ – O²⁻). The formulas obtained by calculating the six homologous series have the following form: Ir⁴⁺_{5n}Ir⁵⁺₄O_{10n+10}, Ir⁴⁺₅Ir⁵⁺_{4n}O_{10n+10}, Ca₂Ir⁴⁺_nO_{2n+2}, Ca_{2n}Ir⁴⁺_nO_{2n+2}, Ca₅Ir⁵⁺_{2n}O_{5n+5} and Ca_{5n}Ir⁵⁺₂O_{5n+5}. Homologous series of three-component systems were calculated on the basis of compounds Ir⁴⁺₅₄Ir⁵⁺₄O₂₀, Ca₅Ir⁵⁺₂O₁₀ and Ca₂Ir⁴⁺₄O₄, which are involved in the formation of the four-component compound Ca₁₀Ir⁴⁺₅Ir⁵⁺₄O₃₀. The calculated formulas of homologous series potentially make it possible to improve the characteristics of already known three-component catalysts, for example, Ca₂Ir⁴⁺₄O₄, Ca₂Ir⁴⁺₂O₆ and Ca₄Ir⁴⁺₆O₆.

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

Введение

Химические соединения (ХС) используются в большинстве различных приборов. Как известно, любое многокомпонентное ХС является членом какой-нибудь гомологической серии (ГС) с $n \geq 1$. Фундаментальные характеристики гомологов одной и той же ГС изменяются закономерно, что является важным фактором для изучения ГС. При использовании этой особенности ГС у исследователей появляется возможность вести поиск новых ХС-гомологов, свойства которых могут оказаться лучше, чем у известного ХС, который уже используется в каком-либо приборе.

Известны, например, экспериментально полученные ХС, описываемые формулами, которым свойственно закономерное изменение состава:

– известны «фазы Магнели»: Me_nO_{3n-1}, W_nO_{3n-2} [4]. Следует заметить, что при условии соблюдения электро нейтральности формул ХС во всех кристаллических решетках ХС, описываемых формулами из [1], [2], [3], [4], которые относятся к «фазам Магнели», должны присутствовать два разно валентных одноименных катиона: Me_nO_{3n-1}, W_nO_{3n-2} (M ≡ Mo, W, Re), где $n = 20, 38-40$ [4] и M_nO_{2n-1} (M ≡ Ti, V) [2], [3], [4];

– известны фазы систем (La-Ni-O), (La-Cu-O) [5], [6], [7], [8], [9], (Sr-Ru-O) [10], составы которых обобщены авторами в виде формул ГС;

– известны «фазы Андерсона» M⁺₄Ti⁴⁺_nO_{2(n+1)}, где (M⁺ ≡ Li⁺, Na⁺, K⁺, Rb⁺, Cs⁺ и $n = 1-9$) [11];

– известна формула ГС системы (Fe²⁺ – Fe³⁺ – O²⁻): nFeO·mFe₂O₃, где (n = 1-4, 6) [12];

– известна формула ГС системы (Sr²⁺ – Ti⁴⁺ – O²⁻) [13];

– известна формула ГС системы (Ba²⁺ – Cu²⁺ – O²⁻) [14], [15].

Однако, как показано в работах [16], [17], [18], [19], составы, обобщенные авторами в приведенных ранее работах формулами, якобы относящимися к ГС, к сожалению, не относятся к последним по следующим причинам: представленные формулы не электро-нейтральны, так как в них отсутствуют одноименные разно валентные химические элементы (ХЭ). Кроме этого в основном это вызвано отсутствием знаний законов формирования ГС.

В работах [16], [17], [18], [19] впервые были разработаны основы формирования формул ГС для трех компонентных систем ионов ХЭ, ($A^{a+} - B^{b+} - C^{c-}$), в обобщенном виде, которые впоследствии были развиты для четырех компонентных систем ($A^{a+} - B^{b+} - D^{d+} - C^{c-}$) [21], [22] и для пяти компонентных систем ($A^{a+} - B^{b+} - D^{d+} - F^{f+} - C^{c-}$) [22], [24], [25], [26]. Кроме этого, для четырех- и пяти компонентных систем в работе [22] показано, что ГС могут развиваться только в сторону двух компонентных ХС (ДХС), а в сторону трех компонентных ХС (ТХС) – ГС не могут развиваться. Разработанный способ расчета формул ГС использовался в ряде работ применительно к различным конкретным системам ионов ХЭ: ($Na^{+} - Ti^{4+} - O^{2-}$), ($Li^{+} - Ti^{4+} - O^{2-}$), ($K^{+} - V^{5+} - O^{2-}$), ($Ba^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-}$), ($Li^{+} - Fe^{2+} - PO_4^{3-}$), ($Zn^{2+} - Ge^{4+} - P^{3-}$) [17], [18], [19].

Рассчитанные в работах [17], [18] формулы ГС системы ($M^{+} - Ti^{4+} - O^{2-}$), где $M^{+} \equiv Li^{+}, Na^{+}, K^{+}$, полностью совпадают с формулой ГС, полученной только на основе экспериментов в [11].

Соединения пирохлора иридия (Na, Ca)_{2-x}(Ir_{2-y}M_y)O₆, где ($M = Sb, Zr, Ru, Rh$), в частности, соединение $Ca_{2-x}Ir_2O_6 \cdot nH_2O$ проявляют высокую электро каталитическую активность при выделении кислорода из водных в сильно кислотных условиях при ~80 °С с сохранением стабильности структуры [27], [28]. Авторы работ [29], [30] обнаружили в кристаллической решетке $Ca_5Ir_3O_{12}$ присутствие ионов Ir^{4+} и Ir^{5+} в соотношении 1/2. Следуя работам [29], [30] и соблюдая электро нейтральность формулы соединения $Ca_5Ir_3O_{12}$ правильно записать так: $Ca_5Ir_3O_{12} \equiv Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$ [29]. По этой причине, при поиске новых соединений в системе (кальций-иридий-кислород), которой принадлежит соединение $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$, с помощью формул ГС химических соединений, необходимо эту систему ХЭ представлять как четырех компонентную систему ионов ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) в виде треугольной пирамиды [6], [31]. Учитывая большой интерес к соединению $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$ как к катализатору, в работе [31] были рассчитаны формулы ГС химических соединений системы ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) на базе этого четырехкомпонентного соединения, $Ca_5Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{12}$: $Ca_{7n-2}Ir^{4+}Ir^{5+}_2O_{7n+5}$, $Ca_5Ir^{4+}_{5n-4}Ir^{5+}_2O_{10n+2}$, $Ca_{25}Ir^{4+}_5Ir^{5+}_{14n-4}O_{35n+25}$. Расчет ГС системы ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) оказался возможным при ее представлении треугольной пирамидой, в углы основания которой помещены ионы Ca^{2+}, Ir^{4+} и Ir^{5+} , а в вершине – O^{2-} [27].

Формирование трех- и четырех компонентных ГС системы ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) можно представить, если выявить закономерности химических взаимодействий химических компонент этой системы. Это удастся осуществить, если сначала рассмотреть в трех компонентных подсистемах ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-}$), ($Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) и ($Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) цепь последовательно протекающих химических взаимодействий начиная с образования окислов CaO, IrO_2 и Ir_2O_5 . При этом, следует учесть существование соединений $Ca_2Ir^{4+}O_4, Ca_2Ir^{4+}_2O_6$ и $Ca_4Ir^{4+}O_6$, которые известны как термо- и кислотоустойчивые катализаторы для выделения кислорода в кислой среде [27], [28], [32].

Как показывают работы [17], [19], [22], геометрические особенности треугольника и треугольной пирамиды дают возможность из всех выявленных химических реакций определить те, которые ответственны за формирование ГС.

Так, для системы ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) интересно проследить процесс формирования не только четырех компонентных ГС, но и ГС трех компонентных подсистем ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-}$), ($Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) и ($Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$), так как гомологи трех компонентных ГС (ТГС) участвуют в формировании четырех компонентных ГС (ЧГС) [20], [23], [31].

Цель работы: рассчитать формулы ГС ХС трех компонентных подсистем ($Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$), ($Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) и ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-}$).

Основная часть

При определении схемы формирования ГС системы ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) необходимо сначала рассмотреть трех компонентные подсистемы ($Ir^{4+} - Ir^{5+} - O^{2-}$), ($Ca^{2+} - Ir^{5+} - O^{2-}$) и ($Ca^{2+} - Ir^{4+} - O^{2-}$), так как они являются боковыми гранями треугольной пирамиды и члены ТГС участвуют в формировании четырех компонентных ГС [20], [23], [31].

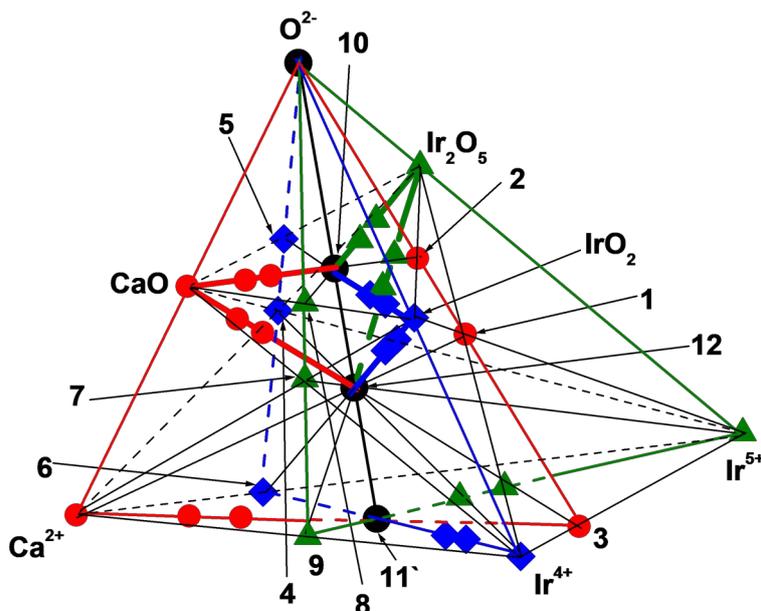


Рисунок 1 - Система ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$)
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.7.3.1>

На рис. 1:

- т. 1 = $[\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{20+}$, т. 2 = $\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}$, т. 3 = $[\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{40+}$, т. 4 = $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5]^{10+}$,
 т. 5 = $\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}$, т. 6 = $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2]^{20+}$, т. 7 = $([\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_2]^{4+})$, т. 8 = $\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4$,
 т. 9 = $[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}]^{8+}$, т. 10 = $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_{20}\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{60} \equiv \text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$,
 т. 11 = $[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{60+}$, т. 12 = $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_{20}\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{20}]^{80+}$,
 т. 13 = $[\text{Ca}_{30}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}]^{40+}$, т. 14 = $\text{Ca}_{30}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{50}$, т. 15 = $[\text{Ca}_{30}\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{100+}$,
 т. 16 = $[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{15}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}]^{40+}$, т. 17 = $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{15}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{50}$, т. 18 = $[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{4+}_{15}\text{Ir}^{5+}_4]^{100+}$.

При решении поставленной задачи рассматривается цепь последовательно протекающих химических взаимодействий начиная с образования активированных окислов Ir_2O_5 , IrO_2 и CaO , которые могут взаимодействовать друг с другом с образованием ряда ТХС $_{n \geq 1}$ — гомологов различных ТГС. На рис. 1–4 взаимодействия ДХС-окислов друг с другом представляются отрезками ($\text{Ir}_2\text{O}_5 - \text{IrO}_2$), ($\text{IrO}_2 - \text{CaO}$) и ($\text{Ir}_2\text{O}_5 - \text{CaO}$).

В трех компонентных подсистемах ионов ХЭ ДХС-окислы могут также взаимодействовать с недостающим в их составе положительно заряженным ионом ХЭ с образованием трех компонентных заряженных кластеров (ТЗК $_{n \geq 1}$) (рис. 1–4).

В свою очередь, следуя последовательности чередования протекающих взаимодействий, ТЗК $_{n \geq 1}$ могут окисляться образуя ТХС $_{n \geq 1}$ — гомологи (рис. 1–4).

Эти же ТХС $_{n \geq 1}$, как сказано выше, могут также образоваться в результате химического взаимодействия ДХС-окислов друг с другом в соответствии с рассматриваемой системой ионов ХЭ.

Рассматриваемые выше взаимодействия представляются в треугольниках ($\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$), ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$) или ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-}$) соответствующими отрезками: ($\text{Ir}_2\text{O}_5 - \text{IrO}_2$), ($\text{IrO}_2 - \text{Ir}^{5+}$), ($\text{Ir}_2\text{O}_5 - \text{Ir}^{4+}$), ($\text{CaO} - \text{Ir}_2\text{O}_5$), ($\text{CaO} - \text{Ir}^{5+}$), ($\text{Ir}_2\text{O}_5 - \text{Ca}^{2+}$), ($\text{CaO} - \text{IrO}_2$), ($\text{CaO} - \text{Ir}^{4+}$), ($\text{IrO}_2 - \text{Ca}^{2+}$) на рис. 1–4.

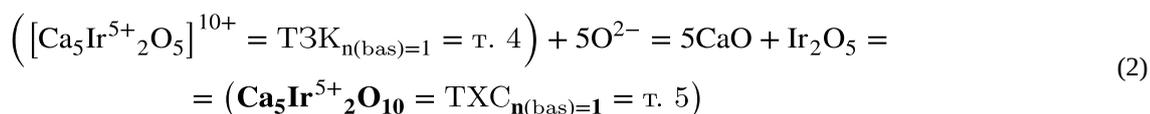
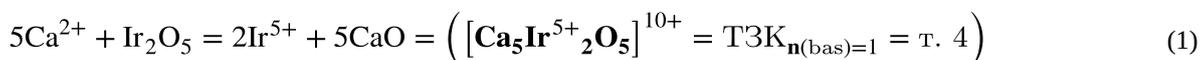
2.1. Трехкомпонентные подсистемы

Как отмечалось выше, для расчета формул ЧГС необходимо вначале рассмотреть схемы формирования ТГС в подсистемах ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-}$), ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$) и ($\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$) на рис. 1–4.

2.1.1. Подсистема ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$)

Следуя последовательному чередованию взаимодействий в подсистеме ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$) можно увидеть, что кластер CaO реагируя с Ir^{5+} , а кластер Ir_2O_5 реагируя с Ca^{2+} образуют **один и тот же кластер** ($[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5]^{10+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 4}$) на рис. 1, 2.

В свою очередь, кластеры ($[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5]^{10+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 4}$) и ($[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2]^{20+} = \text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 6}$) окисляясь образуют кластер ($\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}$) на рис. 1, 2:



$$\left\{ 5\text{Ca}^{2+} + 2\text{Ir}^{5+} = \left([\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2]^{20+} = \text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 6} \right) \right\} + 10\text{O}^{2-} =$$

$$= (\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}) \quad (3)$$

В подсистеме ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$) базовый кластер ($\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}$) взаимодействуя с Ir^{5+} начинает формировать $\alpha\text{-ГС-1}$ (направление Ir_2O_5), а реагируя с Ca^{2+} начинает формировать $\alpha\text{-ГС-2}$ (направление CaO) на рис. 1, 2.

2.1.1.1. Направление Ir_2O_5

Взаимодействие базового кластера ($\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}$) с Ir^{5+} и взаимодействие Ca^{2+} с Ir_2O_5 производят второй гомолог $\alpha\text{-ГС-1}$ ($[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{10+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 19}$), который окисляясь образует второй гомолог той же ГС-1 ($\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{15} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 20}$) на рис. 2:

$$(\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}) + 2\text{Ir}^{5+} = 5\text{Ca}^{2+} + 2\text{Ir}_2\text{O}_5 =$$

$$= \left([\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{10+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 19} \right) \quad (4)$$

$$\left([\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{10+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 19} \right) + 5\text{O}^{2-} = 5\text{CaO} + 2\text{Ir}_2\text{O}_5 =$$

$$= (\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{15} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 20}) \quad (5)$$

Гомологическая разница Δ для $\alpha\text{-ГС-1}$ определится так:

$$\Delta = (\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{15} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 20}) - (\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}) = \text{Ir}_2\text{O}_5 \quad (6)$$

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

$$\text{ветвь ХС } \alpha\text{-ГС-1} - (\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}) +$$

$$+(n-1)\text{Ir}_2\text{O}_5 = \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_{2n}\text{O}_{5n+5} \quad (7)$$

2.1.1.2. Направление CaO

Взаимодействие базового кластера ($\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}$) с Ca^{2+} и взаимодействие CaO с Ir^{5+} производят второй гомолог $\alpha\text{-ГС-2}$ ($[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}]^{10+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 22}$), который окисляясь образует второй гомолог той же ГС-2 ($\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{15} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 23}$) на рис. 2:

$$(\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}) + 5\text{Ca}^{2+} = 2\text{Ir}^{5+} + 10\text{CaO} =$$

$$= \left([\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}]^{10+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 22} \right) \quad (8)$$

$$\left([\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}]^{10+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 22} \right) + 5\text{O}^{2-} = 10\text{CaO} + \text{Ir}_2\text{O}_5 =$$

$$= (\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{15} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 23}) \quad (9)$$

Гомологическая разница Δ для $\alpha\text{-ГС-2}$ определится так:

$$\Delta = (\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{15} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 23}) -$$

$$- (\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}) = \text{Ca}_5\text{O}_5 \quad (10)$$

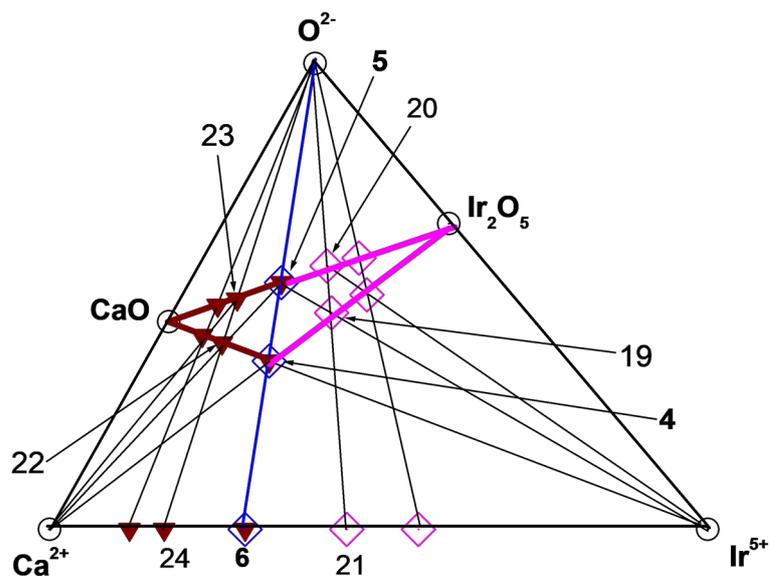
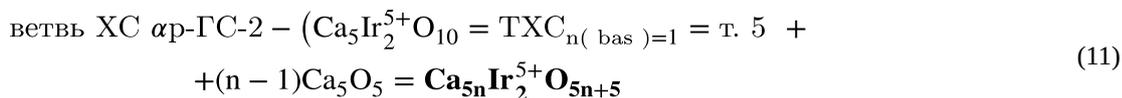


Рисунок 2 - Подсистема ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-}$)
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.7.3.2>

На рис. 2:

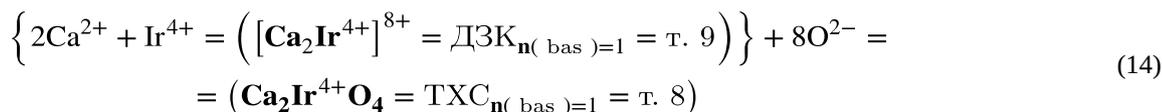
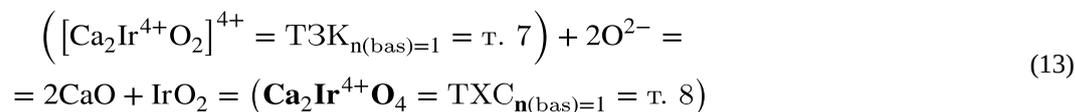
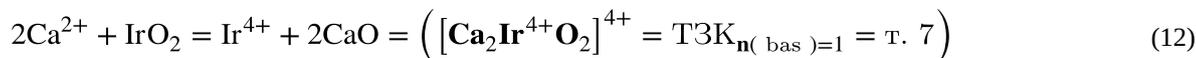
т. 4 = $\text{TЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_5^{10+}$, **т. 5** = $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}$, **т. 6** = $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2]^{20+}$,
т. 19 = $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{10+}$, **т. 20** = $\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{15}$, **т. 21** = $[\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{30+}$, **т. 22** = $[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10}]^{10+}$,
т. 23 = $\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{15}$, **т. 24** = $[\text{Ca}_{10}\text{Ir}^{5+}_2]^{30+}$.

Так как ($\text{TХС}_n = \text{TХС}_{n-1} + k \cdot \Delta$), ($\text{TХС}_{n-1} = \text{TХС}_{n(\text{bas})} - k_{\text{bas}} \cdot \Delta$) и ($n_{(\text{bas})} = k_{\text{bas}} + 1$), то выясняется, что при определении TХС_{n-1} , вычитать формулу ($\Delta = \text{Ca}_5\text{O}_5$) из формулы ($\text{Ca}_5\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{10} = \text{TХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 5}$) нельзя. Следовательно, $k_{\text{bas}} = 0$ и $n_{(\text{bas})} = 1$. Тогда получим формулу ар-ГС-2:



2.1.2. Подсистема ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-}$)

В подсистеме ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-}$) кластер CaO реагируя с Ir^{4+} , а кластер IrO_2 взаимодействуя с Ca^{2+} образуют **один и тот же кластер** ($[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_2]^{4+} = \text{TЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 7}$). В свою очередь, кластеры ($[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_2]^{4+} = \text{TЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 7}$) и ($[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}]^{8+} = \text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 9}$) окисляясь образуют кластер ($\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4 = \text{TХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 8}$) на рис. 1, 3:



В подсистеме ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-}$) кластер ($\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4 = \text{TXC}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 8}$) взаимодействуя с Ir^{4+} начинает формировать $\alpha\text{m-ГC-3}$, а реагируя с Ca^{2+} начинает формировать $\alpha\text{p-ГC-4}$ на рис. 1, 3:

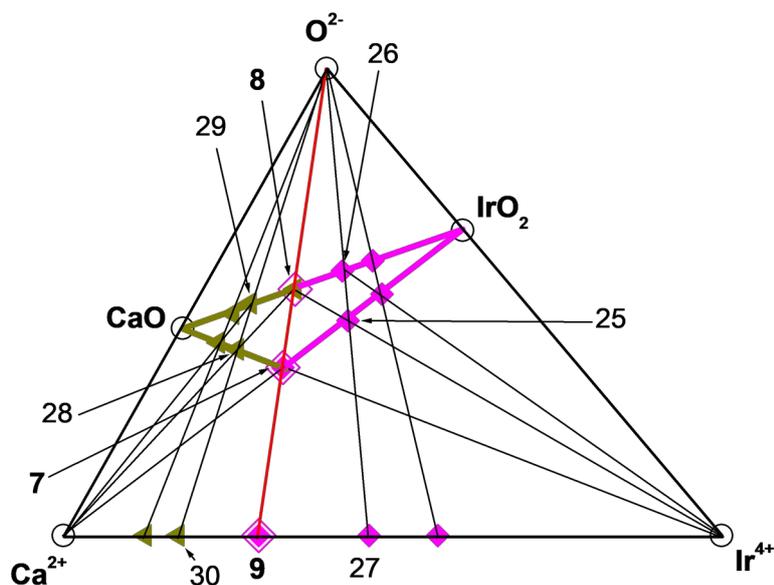


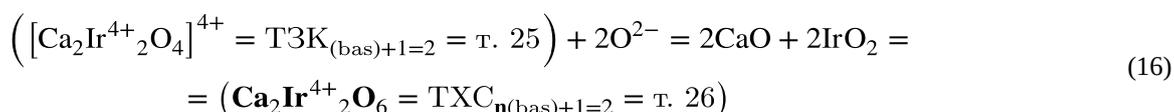
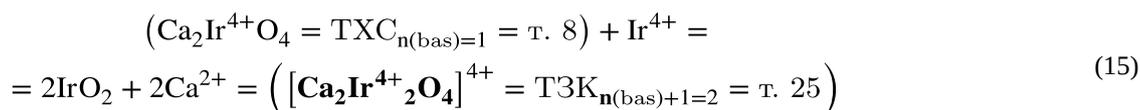
Рисунок 3 - Подсистема ($\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-}$)
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.7.3.3>

На рис. 3:

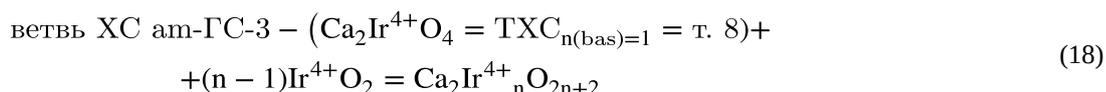
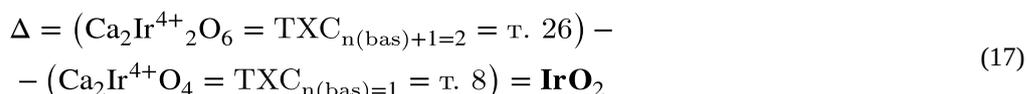
т. 7 = $\text{TЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_2]^{4+}$, **т. 8** = $\text{TXC}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4$, **т. 9** = $[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}]^{8+}$,
т. 25 = $[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_2\text{O}_4]^{4+}$, **т. 26** = $\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_2\text{O}_6$, **т. 27** = $[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_2]^{12+}$, **т. 28** = $[\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}\text{O}_4]^{4+}$,
т. 29 = $\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}\text{O}_6$, **т. 30** = $[\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}]^{12+}$.

2.1.2.1. Направление IrO_2

Взаимодействие базового кластера ($\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4 = \text{TXC}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 8}$) с Ir^{4+} и взаимодействие Ca^{2+} с Ir_2O_5 производят второй гомолог $\alpha\text{m-ГC-3}$ ($[\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_2\text{O}_4]^{4+} = \text{TЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 25}$), который окисляясь образует второй гомолог той же ГC-3 ($\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}_2\text{O}_6 = \text{TXC}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 26}$) на рис. 3:

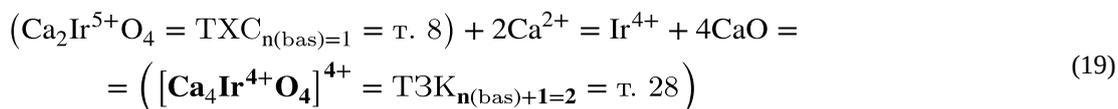


Гомологическая разница Δ для $\alpha\text{m-ГC-3}$ определится так:



2.1.2.2. Направление CaO

Взаимодействие базового кластера ($\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4 = \text{TXC}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 8}$) с Ca^{2+} и взаимодействие CaO с Ir^{4+} производят второй гомолог $\alpha\text{p-ГC-4}$ ($[\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}\text{O}_4]^{4+} = \text{TЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 28}$), который окисляясь образует второй гомолог той же ГC-4 ($\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}\text{O}_6 = \text{TXC}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 29}$) на рис. 3:



$$\begin{aligned} \left([\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}\text{O}_4]^{4+} = \text{TЗК}_{\text{n}(\text{bas})+1=2} = \text{т. 28} \right) + 2\text{O}^{2-} = \text{IrO}_2 + 4\text{CaO} = \\ = (\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}\text{O}_6 = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})+1=2} = \text{т. 29}) \end{aligned} \quad (20)$$

Гомологическая разница Δ для αp -ГС-4 определится так:

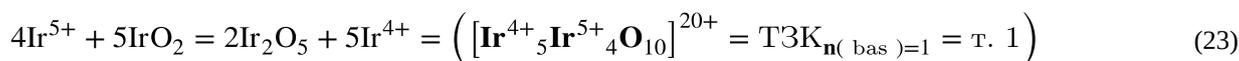
$$\begin{aligned} \Delta = (\text{Ca}_4\text{Ir}^{4+}\text{O}_6 = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})+1=2} = \text{т. 29}) - \\ - (\text{Ca}_2\text{Ir}^{5+}\text{O}_4 = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 8}) = \text{Ca}_2\text{O}_2 \end{aligned} \quad (21)$$

Так как $(\text{ТХС}_{\text{n}} = \text{ТХС}_{\text{n}-1} + k \cdot \Delta)$, $(\text{ТХС}_{\text{n}-1} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})} - k_{\text{bas}} \cdot \Delta)$ и $(\text{n}_{(\text{bas})} = k_{\text{bas}} + 1)$, то выясняется, что при определении $\text{ТХС}_{\text{n}-1}$, вычитать формулу $(\Delta = \text{Ca}_2\text{O}_2)$ из формулы $(\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4 = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 8})$ нельзя. Следовательно, $k_{\text{basw}} = 0$ и $\text{n}_{(\text{bas})} = 1$. Тогда получим формулу αp -ГС-4:

$$\begin{aligned} \text{ветвь XC } \alpha\text{p-ГС-4} - (\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4 = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 8}) + \\ + (\text{n} - 1)\text{Ca}_2\text{O}_2 = \text{Ca}_{2\text{n}}\text{Ir}^{4+}\text{O}_{2\text{n}+2} \end{aligned} \quad (22)$$

2.1.3. Подсистема $(\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-})$

В подсистеме $(\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-})$ кластер IrO_2 взаимодействуя с Ir^{5+} , а кластер Ir_2O_5 взаимодействуя с Ir^{4+} образуют **один и тот же кластер** $([\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{20+} = \text{TЗК}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 1})$. В свою очередь, кластеры $([\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{20+} = \text{TЗК}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 1})$ и $([\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{40+} = \text{ДЗК}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 3})$ окисляясь образуют кластер $(\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 2})$ на рис. 1, 4:



$$\begin{aligned} \left([\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{20+} = \text{TЗК}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 1} \right) + 10\text{O}^{2-} = \\ = 5\text{IrO}_2 + 2\text{Ir}_2\text{O}_5 = (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 2}) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \left\{ 5\text{Ir}^{4+} + 4\text{Ir}^{5+} = \left([\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{40+} = \text{ДЗК}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 3} \right) \right\} + 20\text{O}^{2-} = \\ = (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 2}) \end{aligned} \quad (25)$$

В подсистеме $(\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-})$ кластер $(\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 2})$ взаимодействуя с Ir^{5+} начинает формировать αm -ГС-5, а реагируя с Ir^{5+} начинает формировать αp -ГС-6 на рис. 4.

2.1.3.1. Направление Ir_2O_5

Взаимодействие базового кластера $(\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 2})$ с Ir^{5+} и взаимодействие IrO_2 с Ir^{5+} производят второй гомолог αm -ГС-5 $([\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{20}]^{20+} = \text{TЗК}_{\text{n}(\text{bas})+1=2} = \text{т. 31})$, который окисляясь образует второй гомолог той же ГС-5 $(\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{30} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})+1=2} = \text{т. 32})$ на рис. 4:

$$\begin{aligned} (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})=1} = \text{т. 2}) + 4\text{Ir}^{5+} = 5\text{Ir}^{4+} + 4\text{Ir}_2\text{O}_5 = \\ = \left([\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{20}]^{20+} = \text{TЗК}_{\text{n}(\text{bas})+1=2} = \text{т. 31} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \left([\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{20}]^{20+} = \text{TЗК}_{\text{n}(\text{bas})+1=2} = \text{т. 31} \right) + 10\text{O}^{2-} = 5\text{IrO}_2 + 4\text{Ir}_2\text{O}_5 = \\ = (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{30} = \text{ТХС}_{\text{n}(\text{bas})+1=2} = \text{т. 32}) \end{aligned} \quad (27)$$

Гомологическая разница Δ для αm -ГС-5 определится так:

$$\begin{aligned} \Delta &= (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 32}) - \\ &- (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 2}) = \text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10} \end{aligned} \quad (28)$$

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 $(\Delta = \text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10})$ из формулы $(\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 2})$ нельзя. Следовательно, $k_{\text{bas}} = 0$ и $n_{(\text{bas})} = 1$. Тогда получим формулу αm -ГС-5:

$$\begin{aligned} \text{ветвь ХС } \alpha\text{m}\text{-ГС-5} &- (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 2}) + \\ &+ (n-1)\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10} = \text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_{4n}\text{O}_{10n+10} \end{aligned} \quad (29)$$

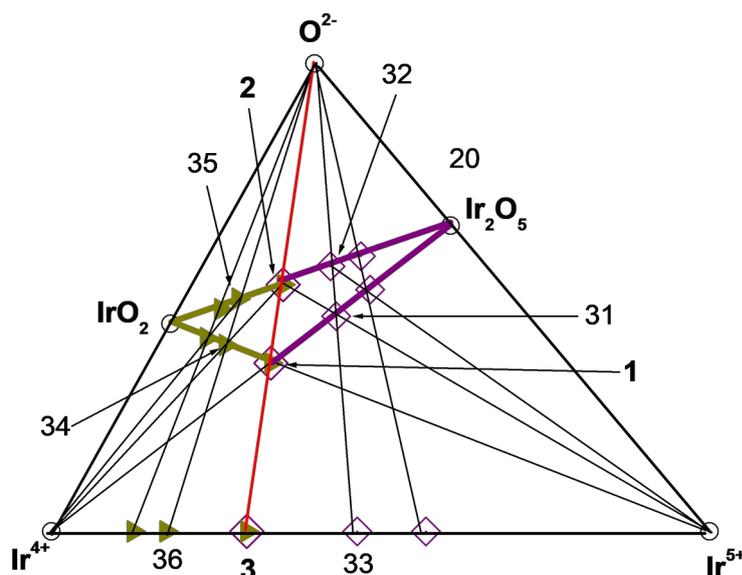


Рисунок 4 - Подсистема $(\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-})$
DOI: <https://doi.org/10.60797/CHEM.2025.7.3.4>

На рис. 4:

т. 1 = $\text{ЧЗК}_{n(\text{bas})=1} = [\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{10}]^{20+}$, **т. 2** = $\text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}$, **т. 3** $[\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4]^{40+}$,

т. 31 = $[\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{20}]^{20+}$, **т. 32** = $\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8\text{O}_{30}$, **т. 33** = $[\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_8]^{60+}$,

т. 34 = $([\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}]^{20+}$, **т. 35** = $\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30}$, **т. 36** = $[\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4]^{60+}$.

2.1.3.2. Направление IrO_2

Взаимодействие базового кластера $(\text{Ca}_2\text{Ir}^{4+}\text{O}_4 = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 8})$ с Ir^{4+} и взаимодействие IrO_2 с Ir^{5+} производят второй гомолог αr -ГС-6 $(([\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}]^{20+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 34})$, который окисляясь образует второй гомолог той же ГС-6 $(\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 35})$ на рис. 4:

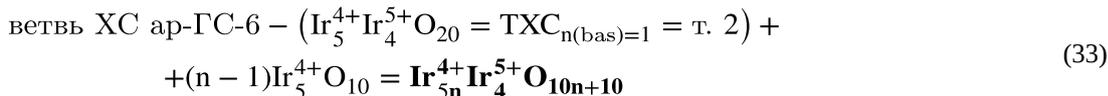
$$\begin{aligned} (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 2}) + 5\text{Ir}^{4+} &= 4\text{Ir}^{5+} + 10\text{IrO}_2 = \\ &= ([\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}]^{20+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 34}) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} ([\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20}]^{20+} = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 34}) + 10\text{O}^{2-} &= 10\text{IrO}_2 + 2\text{Ir}_2\text{O}_5 = \\ (\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 35}) \end{aligned} \quad (31)$$

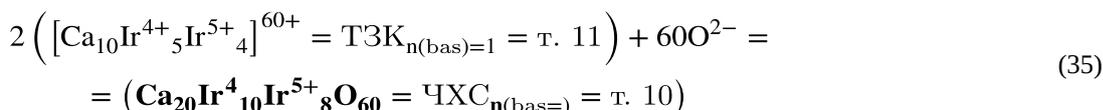
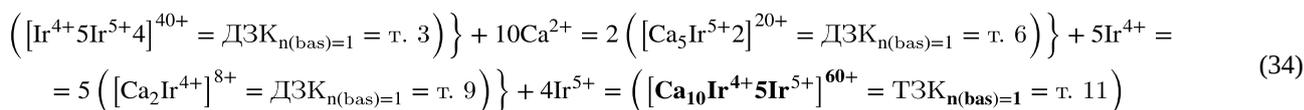
Гомологическая разница Δ для αr -ГС-6 определится так:

$$\begin{aligned} \Delta &= (\text{Ir}^{4+}_{10}\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{30} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})+1=2} = \text{т. 35}) - \\ &- (\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \text{т. 2}) = \text{Ir}^{4+}_5\text{O}_{10} \end{aligned} \quad (32)$$

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 ТХС_{n-1} , вычитать формулу $(\Delta = \text{Ir}^{4+}_5\text{O}_{10})$ из формулы $(\text{Ir}^{4+}_5\text{Ir}^{5+}_4\text{O}_{20} = \text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 2)$ нельзя. Следовательно, $k_{\text{bas}} = 0$ и $n_{(\text{bas})} = 1$. Тогда получим формулу ар-ГС-6:

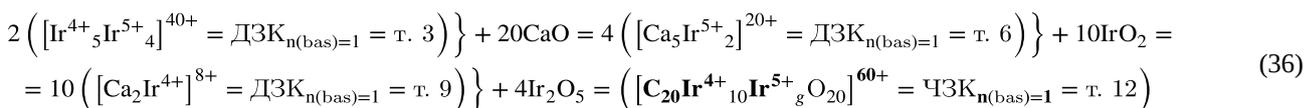


Немного о связи ТХС-гомологов с формированием ЧГС: полученные выше кластеры в виде $(\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 3, \tau. 6$ и $\tau. 9)$ взаимодействуя с недостающим в их составе ионом ХЭ, Ca^{2+} , Ir^{4+} и Ir^{5+} , соответственно, образуют в подсистеме $(\mathbf{Ca}^{2+}\mathbf{-Ir}^{4+}\mathbf{-Ir}^{5+})$ кластер $(\text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 11)$, который состоит только из положительно заряженных ионов ХЭ, Ca^{2+} , Ir^{4+} и Ir^{5+} на рис. 1. Кластер $(\text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 11)$ окисляясь образует четырех компонентный кластер $(\mathbf{Ca}_{20}\mathbf{Ir}^{4+}_{10}\mathbf{Ir}^{5+}_8\mathbf{O}_{60} = \mathbf{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 10)$, который является базовым при формировании трех ГС, развивающихся в сторону CaO , IrO_2 и Ir_2O_5 на рис. 1:

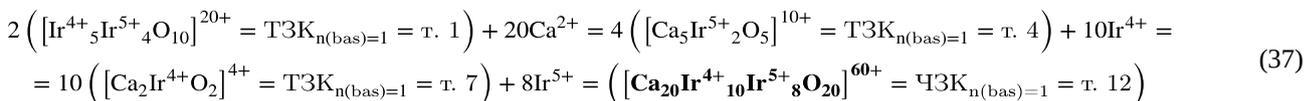


Уравнения реакций (34) и (35) говорит об участии двух компонентных кластеров в виде $(\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 3, \tau. 6$ и $\tau. 9)$ в формировании первых четырех компонентных ГС начиная с образования первого гомолога $(\mathbf{Ca}_{20}\mathbf{Ir}^{4+}_{10}\mathbf{Ir}^{5+}_8\mathbf{O}_{60} = \mathbf{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 10)$.

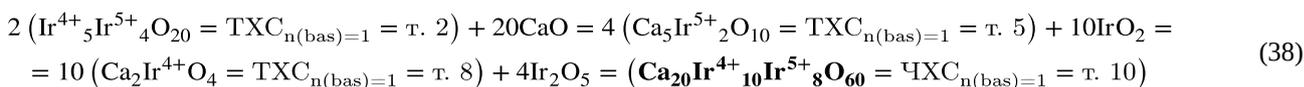
Кроме этого, кластеры в виде $(\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 3, \tau. 6$ и $\tau. 9)$ взаимодействуя с активированными CaO , IrO_2 и Ir_2O_5 , соответственно, образуют в системе $(\mathbf{Ca}^{2+}\mathbf{-Ir}^{4+}\mathbf{-Ir}^{5+}\mathbf{-O}^{2-})$ общий для них активированный кластер $([\mathbf{Ca}_{20}\mathbf{Ir}^{4+}_{10}\mathbf{Ir}^{5+}_8\mathbf{O}_{20}]^{60+} = \mathbf{ЧЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 12)$ на 1, также этим подтверждая участие $(\text{ДЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 3, \tau. 6$ и $\tau. 9)$ в формировании ЧГС:



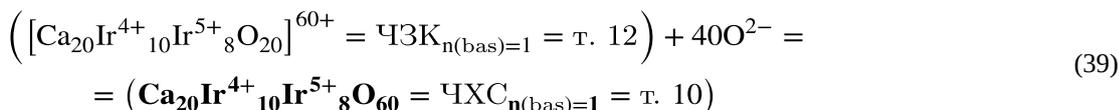
Рассматривая формирование ЧГС из рис. 1 можно увидеть, что полученные в уравнениях реакций (23), (1) и (12) кластеры $(\text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 1, \tau. 4$ и $\tau. 7)$, соответственно, могут взаимодействовать с недостающим в их составе ионом ХЭ, Ca^{2+} , Ir^{4+} или Ir^{5+} , соответственно, с образованием **одного общего для них кластера** $(\mathbf{ЧЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 12)$, что говорит об участии $(\text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 1, \tau. 4$ и $\tau. 7)$ в формировании ЧГС на рис. 1:



Геометрические особенности треугольника и треугольной пирамиды заключаются, в частности, в том, что **только в одном случае** для рассматриваемых выше реакций (1)-(12) все отрезки $\{(\tau. 1 = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} - \text{Ca}^{2+})\}$, $\{(\tau. 4 = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} - \text{Ir}^{4+})\}$, $\{(\tau. 7 = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} - \text{Ir}^{5+})\}$, $\{(\tau. 3 = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} - \text{CaO})\}$, $\{(\tau. 6 = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} - \text{IrO}_2)\}$ и $\{(\tau. 9 = \text{ТЗК}_{n(\text{bas})=1} - \text{Ir}_2\text{O}_5)\}$ **пересекаются только в одной точке**, $(\tau. 12 = \mathbf{ЧЗК}_{n(\text{bas})=1})$ на рис. 1. Это соответствует случаю, когда все три ЧГС основаны базовым кластером $(\mathbf{Ca}_{20}\mathbf{Ir}^{4+}_{10}\mathbf{Ir}^{5+}_8\mathbf{O}_{60} = \mathbf{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 10)$, который, в свою очередь, образован взаимодействием трех компонентных базовых кластеров $(\mathbf{Ca}_5\mathbf{Ir}^{5+}_2\mathbf{O}_{10} = \mathbf{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 5)$ с IrO_2 , $(\mathbf{Ca}_2\mathbf{Ir}^{4+}\mathbf{O}_4 = \mathbf{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 8)$ с Ir_2O_5 и $(\mathbf{Ir}^{4+}_5\mathbf{Ir}^{5+}_4\mathbf{O}_{20} = \mathbf{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 2)$ с CaO . В тоже время, $\text{ТХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 5, \tau. 8$ и $\tau. 2$, полученные согласно уравнениям реакций (2) и (13) и (24) также могут взаимодействовать с недостающим в их составе ДХС-окислом, IrO_2 и Ir_2O_5 и CaO , соответственно, с образованием **одного общего для них базового кластера** $(\mathbf{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 10)$ на рис. 1:



Причем, кластер $(\mathbf{ЧЗК}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 12)$ связан с кластером $(\mathbf{ЧХС}_{n(\text{bas})=1} = \tau. 10)$ реакцией окисления на рис. 1:



Заключение

Трех компонентные подсистемы $(\text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-})$, $(\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-})$ и $(\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{O}^{2-})$ являются частью четырех компонентной системы $(\mathbf{Ca}^{2+}\mathbf{-Ir}^{4+}\mathbf{-Ir}^{5+}\mathbf{-O}^{2-})$. Трех компонентные подсистемы представляются треугольником, в углы основания которого помещены положительно заряженные ионы ХЭ, а в его вершину помещен анион. Геометрические особенности треугольника, представляющего трех компонентную подсистему, позволяют рассчитать химические взаимодействия членов подсистемы и выявить среди них те, которые участвуют в формировании ТГС. Это удастся осуществить в результате рассмотрения цепи последовательно протекающих химических взаимодействий ионов ХЭ и

более сложных по составу ТХС и ТЗК, начиная с образования двух компонентных ХС, CaO, IrO₂ и Ir₂O₅. В результате, для трех компонентных подсистем расчетом определены формулы шести ГС: Ca₅Ir⁵⁺_{2n}O_{5n+5}, Ca_{5n}Ir⁵⁺₂O_{5n+5}, Ca₂Ir⁴⁺_nO_{2n+2}, Ca_{2n}Ir⁴⁺₂O_{2n+2}, Ir⁴⁺₅Ir⁵⁺_{4n}O_{10n+10} и Ir⁴⁺_{5n}Ir⁵⁺₄O_{10n+10}. Причем известные из экспериментальных работ [27], [28] и [32] соединения (Ca₂Ir⁴⁺O₄ = ТХС_{n=1} = т. 8) и (Ca₂Ir⁴⁺O₆ = ТХС_{n=2} = т. 26) принадлежат αm-ГС-3 Ca₂Ir⁴⁺_nO_{2n+2}, а соединения (Ca₂Ir⁴⁺O₄ = ТХС_{n=1} = т. 8) и (Ca₄Ir⁴⁺O₆ = ТХС_{n=2} = т. 29), принадлежат αr-ГС-4, Ca_{2n}Ir⁴⁺_{2n+2} (рис. 3). Все они получены экспериментально и известны как термо- и кислотоустойчивые катализаторы для выделения кислорода в кислой среде [27], [28], [31]. Как выяснилось, члены трех компонентных подсистем принимают участие в формировании четырех компонентных ГС системы (Ca²⁺ – Ir⁴⁺ – Ir⁵⁺ – O²⁻).

Сказанное выше в соответствии с последовательным чередованием реакций взаимодействия компонент системы ХЭ, начиная с образования ДХС-окислов, CaO, IrO₂ и Ir₂O, формируются **первые** три ЧГС, которые развиваются в направлении CaO, IrO₂ и Ir₂O₅. Первые ЧГС формируются в подсистемах (т. 3 – Ca²⁺ – O²⁻) — направление CaO, (т. 6 – Ir⁴⁺ – O²⁻) — направление IrO₂ и (т. 9 – Ir⁵⁺ – O²⁻) — направление Ir₂O₅ (рис. 1). Эти первые ЧГС основаны базовыми кластерами (ЧХС_{n(bas)=1} = т. 10 = Ca₂₀Ir⁴⁺₁₀Ir⁵⁺₈O₆₀) и (ЧЗК_{n(bas)=1} = т. 12 = [Ca₂₀Ir⁴⁺₁₀Ir⁵⁺₈O₂₀]⁶⁰⁺).

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

- Magneli A. Studies on molybdenum and molybdenum wolfram oxides of the homologous series Me_nO_{3n-1} / A. Magneli, B. Blomberg, H.L. Kihlberg [et al.] // Acta chem. scand. — 1955. — Vol. 9. — № 8. — P. 1382–1390. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.09-1382
- Andersson S. Phase analysis studies on the titanium-oxygen system / S. Andersson, B. Collen, U. Kuylenstierna [et al.] // Acta chem. scand. — 1957. — Vol. 11. — № 10. — P. 1641–1652. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.11-1641
- Andersson S. Studies on vanadium oxides / S. Andersson // Acta chem. scand. — 1954. — Vol. 8. — № 9. — P. 1599–1606. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.08-1599
- Gado P. Wolfram tantalum and wolfram niobium oxides of the M_nO_{3n-2} (ReO₃) series / P. Gado, B. Holmberg, A. Magneli // Acta chem. scand. — 1965. — Vol. 19. — № 8. — P. 2010–2011. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.19-2010
- Gay P.L. Vacancy Ordering in Anion-deficient LaNiO₃ / P.L. Gay, C.N.R. Rao // Z. Naturforsch. — 1975. — Vol. 30a. — № 8. — P. 1092–1093. — DOI: 10.1515/zna-1975-0831
- Goodenough J.B. Further evidence for the coexistence of localized and itinerant 3d electrons in La₂NiO₄ / J.B. Goodenough, S. Ramasesha // Mater. Res. Bull. — 1982. — Vol. 17. — № 3. — P. 383–390. — DOI: 10.1016/0025-5408(82)90089-7
- 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. — DOI: 10.1002/chin.198813036
- Drennan J. An electron microscope investigation of phases in the system La_{n+1}Ni_nO_{3n+1} / J. Drennan, C.P. Tavares, B.C.H. Steele // Mater. Res. Bull. — 1982. — Vol. 17. — № 5. — P. 621.
- Ruddlesden S.N. The compound Sr₃Ti₃O₇ and its structure / S.N. Ruddlesden, P. Popper // Acta Crystallographica. — 1958. — Vol. 11. — № 1. — P. 54–55. — DOI: 10.1107/S0365110X58000128
- Gutmann E. Oriented Growth of Sr_{n+1}Ti_nO_{3n+1} Ruddlesden–Popper Phases in Chemical Solution Deposited Thin Films / E. Gutmann, A.A. Levin, M. Reibold // Journal of Solid State Chemistry. — 2006. — Vol. 179. — № 6. — P. 1864–1869. — DOI: 10.1016/j.jssc.2006.02.021
- Clearfield A. Preparation, structure, and ion-exchange properties of Na₄Ti₉O₂₀·xH₂O / A. Clearfield, J. Lehto // Journal of Solid State Chemistry. — 1988. — Vol. 73. — P. 98–106. — DOI: 10.1016/0022-4596(88)90059-X
- Bykova T. Structural complexity of simple Fe₂O₃ at high pressures and temperatures / T. Bykova, L. Dubrovinsky, N. Dubrovinskaja [et al.] // Nature Communications. — 2016. — Vol. 7. — P. 10661. — DOI: 10.1038/ncomms10661
- Ruddlesden S.N. The compound Sr₃Ti₂O₇ and its structure / S.N. Ruddlesden, P. Popper // Acta Crystallographica. — 1958. — Vol. 11. — № 1. — P. 54–55. — DOI: 10.1107/S0365110X58000128
- Klinkova L.A. On the existence of a homologous series of Ba_nCu_{m+n}O_y oxides with the cubic structure of the BaCuO₂ oxide / L.A. Klinkova, V.I. Nikolaichik, N.V. Barkovskii [et al.] // Physica C: Superconductivity. — 2010. — Vol. 470. — № 22. — P. 2067–2071. — DOI: 10.1016/j.physc.2010.09.013
- Poulus E.F. The crystal structure of BaCuO₂ / E.F. Poulus, G. Miehe, H. Fuess [et al.] // Journal of Solid State Chemistry. — 1991. — Vol. 90. — № 1. — P. 17–26. — DOI: 10.1016/0022-4596(91)90166-F
- 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.
- Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds: (Li⁺ – Ti⁴⁺ – O²⁻), (Na⁺ – Ti⁴⁺ – O²⁻), (K⁺ – V⁵⁺ – O²⁻), (Ba²⁺ – Cu²⁺ – O²⁻) and four-component systems {Li⁺ – Fe²⁺ – (PO₄)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

18. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): three-component systems ($A^{a+} - B^{b+} - C^{c-}$) and ($Na^{+} - Ti^{4+} - O^{2-}$), ($Li^{+} - Ti^{4+} - O^{2-}$), ($K^{+} - V^{5+} - O^{2-}$), ($Ba^{2+} - Cu^{2+} - O^{2-}$) / 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
19. Ундалов Ю.К. Гомологические серии химических соединений в трехкомпонентных системах ($A^{a+} - B^{b+} - C^{c-}$) и ($Zn^{2+} - Ge^{4+} - P^{3-}$) в обобщенном виде / Ю.К. Ундалов // CИFRA. Химия. — 2024. — Т. 1. — № 1. — С. 1–14. — DOI: 10.18454/CHEM.2024.1.1
20. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds of ($Li^{+} - Ni^{3+} - Mn^{3+} - O^{2-}$) system / Yu.K. Undalov, E.I. Terukov, D.V. Agafonov [et al.] // Izvestia of St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University). — 2022. — Vol. 60. — № 86. — P. 11.
21. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): four-component systems ($A^{a+} - B^{b+} - D^{d+} - C^{c-}$) and ($La^{3+} - Ni^{2+} - Ni^{3+} - O^{2-}$) / 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
22. 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", December 30. — 2024. — Pt. 1. — P. 58–74.
23. 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. — P. 110–125. — DOI: 10.34660/inf.2023.53.27.230
24. 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 // CИFRA. Chemistry. — 2024. — № 1(1). — DOI: 10.18454/CHEM.2024.1.3
25. 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 // Proceedings of the International Science Conference "SCIENCE. EDUCATION. PRACTICE", March 26. — 2025. — Pt. 2. — P. 137–146. — DOI: 10.34659/INF.2025.23.47.055
26. 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 // CИFRA. Химия. — 2025. — № 2(5). — DOI: 10.60797/CHEM.2025.5.2
27. 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 // Journal of Materials Chemistry A. — 2021. — Vol. 9. — № 44. — P. 25114–25126. — DOI: 10.1039/D1TA05457K
28. 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
29. Wakeshima M. Electrical and magnetic properties of pseudo-one-dimension calcium iridium oxide $Ca_5Ir_3O_{12}$ / M. Wakeshima, N. Taira, Y. Hinatsu // Solid State Communications. — 2003. — Vol. 125. — № 6. — P. 311–315. — DOI: 10.1016/S0038-1098(02)00823-2
30. 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
31. 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 // CИFRA. Химия. — 2025. — № 3(6). — DOI: 10.60797/CHEM.2025.6.2
32. 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. Magneli A. Studies on molybdenum and molybdenum wolfram oxides of the homologous series Me_nO_{3n-1} / A. Magneli, B. Blomberg, H.L. Kihlberg [et al.] // Acta chem. scand. — 1955. — Vol. 9. — № 8. — P. 1382–1390. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.09-1382
2. Andersson S. Phase analysis studies on the titanium-oxygen system / S. Andersson, B. Collen, U. Kuylenstierna [et al.] // Acta chem. scand. — 1957. — Vol. 11. — № 10. — P. 1641–1652. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.11-1641
3. Andersson S. Studies on vanadium oxides / S. Andersson // Acta chem. scand. — 1954. — Vol. 8. — № 9. — P. 1599–1606. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.08-1599
4. Gado P. Wolfram tantalum and wolfram niobium oxides of the M_nO_{3n-2} (ReO_3) series / P. Gado, B. Holmberg, A. Magneli // Acta chem. scand. — 1965. — Vol. 19. — № 8. — P. 2010–2011. — DOI: 10.3891/acta.chem.scand.19-2010
5. Gay P.L. Vacancy Ordering in Anion-deficient $LaNiO_3$ / P.L. Gay, C.N.R. Rao // Z. Naturforsch. — 1975. — Vol. 30a. — № 8. — P. 1092–1093. — DOI: 10.1515/zna-1975-0831
6. Goodenough J.B. Further evidence for the coexistence of localized and itinerant 3d electrons in La_2NiO_4 / J.B. Goodenough, S. Ramasesha // Mater. Res. Bull. — 1982. — Vol. 17. — № 3. — P. 383–390. — DOI: 10.1016/0025-5408(82)90089-7
7. Savchenko V.F. Sintez i elektricheskie svoystva dvojnogo oksida lantana i nikel'ya [Synthesis and electrical properties of lanthanum nickel double oxide] / V.F. Savchenko, I.Ya. Lyubkina // Neorganicheskie materialy [Inorganic Materials]. — 1986. — Vol. 22. — № 9. — P. 1483–1486. — DOI: 10.1002/chin.198813036 [in Russian]

8. Drennan J. An electron microscope investigation of phases in the system $\text{La}_{n+1}\text{Ni}_n\text{O}_{3n+1}$ / J. Drennan, C.P. Tavares, B.C.H. Steele // *Mater. Res. Bull.* — 1982. — Vol. 17. — № 5. — P. 621.
9. Ruddlesden S.N. The compound $\text{Sr}_3\text{Ti}_3\text{O}_7$ and its structure / S.N. Ruddlesden, P. Popper // *Acta Crystallographica.* — 1958. — Vol. 11. — № 1. — P. 54–55. — DOI: 10.1107/S0365110X58000128
10. Gutmann E. Oriented Growth of $\text{Sr}_{n+1}\text{Ti}_n\text{O}_{3n+1}$ Ruddlesden–Popper Phases in Chemical Solution Deposited Thin Films / E. Gutmann, A.A. Levin, M. Reibold // *Journal of Solid State Chemistry.* — 2006. — Vol. 179. — № 6. — P. 1864–1869. — DOI: 10.1016/j.jssc.2006.02.021
11. Clearfield A. Preparation, structure, and ion-exchange properties of $\text{Na}_4\text{Ti}_9\text{O}_{20} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ / A. Clearfield, J. Lehto // *Journal of Solid State Chemistry.* — 1988. — Vol. 73. — P. 98–106. — DOI: 10.1016/0022-4596(88)90059-X
12. Bykova T. Structural complexity of simple Fe_2O_3 at high pressures and temperatures / T. Bykova, L. Dubrovinsky, N. Dubrovinskaya [et al.] // *Nature Communications.* — 2016. — Vol. 7. — P. 10661. — DOI: 10.1038/ncomms10661
13. Ruddlesden S.N. The compound $\text{Sr}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ and its structure / S.N. Ruddlesden, P. Popper // *Acta Crystallographica.* — 1958. — Vol. 11. — № 1. — P. 54–55. — DOI: 10.1107/S0365110X58000128
14. Klinkova L.A. On the existence of a homologous series of $\text{Ba}_m\text{Cu}_{m+n}\text{O}_y$ oxides with the cubic structure of the BaCuO_2 oxide / L.A. Klinkova, V.I. Nikolaichik, N.V. Barkovskii [et al.] // *Physica C: Superconductivity.* — 2010. — Vol. 470. — № 22. — P. 2067–2071. — DOI: 10.1016/j.physc.2010.09.013
15. Poulus E.F. The crystal structure of BaCuO_2 / E.F. Poulus, G. Miehle, H. Fuess [et al.] // *Journal of Solid State Chemistry.* — 1991. — Vol. 90. — № 1. — P. 17–26. — DOI: 10.1016/0022-4596(91)90166-F
16. Undalov Yu.K. Prognozirovaniye formul mnogokomponentnykh khimicheskikh soedinenii: trekhkomponentnyye sistemy, formirovaniye gomologicheskikh serii soedinenii [Prediction of formulas of multicomponent chemical compounds: three-component systems, formation of homologous series of compounds] / Yu.K. Undalov // *Zhurnal neorganicheskoi khimii* [Russian Journal of Inorganic Chemistry]. — 1998. — Vol. 43. — № 9. — P. 1561–1564. [in Russian]
17. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds: $(\text{Li}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$, $(\text{Na}^+ - \text{Ti}^{4+} - \text{O}^{2-})$, $(\text{K}^+ - \text{V}^{5+} - \text{O}^{2-})$, $(\text{Ba}^{2+} - \text{Cu}^{2+} - \text{O}^{2-})$ and four-component systems $\{\text{Li}^+ - \text{Fe}^{2+} - (\text{PO}_4)^{3-}\}$ / 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
18. 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
19. Undalov Yu.K. Gomologicheskiiye serii khimicheskikh soedinenii v trekhkomponentnykh sistemakh $(\text{A}^{a+} - \text{B}^{b+} - \text{C}^{c-})$ i $(\text{Zn}^{2+} - \text{Ge}^{4+} - \text{P}^{3-})$ v obobshchennom vide [Homologous series of chemical compounds in three-component systems $(\text{A}^{a+} - \text{B}^{b+} - \text{C}^{c-})$ i $(\text{Zn}^{2+} - \text{Ge}^{4+} - \text{P}^{3-})$ in generalized form] / Yu.K. Undalov // *CIFRA. Khimiya* [CIFRA. Chemistry]. — 2024. — Vol. 1. — № 1. — P. 1–14. — DOI: 10.18454/CHEM.2024.1.1 [in Russian]
20. Undalov Yu.K. 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.] // *Izvestia of St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University).* — 2022. — Vol. 60. — № 86. — P. 11.
21. 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
22. 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"*, December 30. — 2024. — Pt. 1. — P. 58–74.
23. Undalov Yu.K. Calculation of formulas of homologous series of chemical compounds (in generalized form): five-component systems $(\text{A}^{a+} - \text{F}^{f+} - [\text{B}_{rd}\text{D}_{wb}]^{(r+w)bd+} - \text{C}^{c-})$ and $(\text{Li}^+ - \text{Fe}^{4+} - [\text{Sr}_3\text{La}_2]^{12+} - \text{O}^{2-})$ / Yu.K. Undalov // *Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA : materials of International University Scientific Forum*, September 19. — 2023. — P. 110–125. — DOI: 10.34660/inf.2023.53.27.230
24. Undalov Yu.K. Homologous series of chemical compounds in the systems $(\text{A}^{a+} - \text{F}^{f+} - [\text{B}_{rd}\text{D}_{wb}]^{(r+w)bd+} - \text{C}^{c-})$ and $(\text{Bi}^{3+} - \text{Cu}^{2+} - [\text{SrCa}]^{4+} - \text{O}^{2-})$ in generalized form / Yu.K. Undalov // *CIFRA. Chemistry.* — 2024. — № 1(1). — DOI: 10.18454/CHEM.2024.1.3
25. 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"*, March 26. — 2025. — Pt. 2. — P. 137–146. — DOI: 10.34659/INF.2025.23.47.055
26. Undalov Yu.K. Raschet gomologicheskikh serii khimicheskikh soedinenii 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. Khimiya* [CIFRA. Chemistry]. — 2025. — № 2(5). — DOI: 10.60797/CHEM.2025.5.2. [in Russian]
27. 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 // *Journal of Materials Chemistry A.* — 2021. — Vol. 9. — № 44. — P. 25114–25126. — DOI: 10.1039/D1TA05457K
28. 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

29. Wakeshima M. Electrical and magnetic properties of pseudo-one-dimension calcium iridium oxide $\text{Ca}_5\text{Ir}_3\text{O}_{12}$ / M. Wakeshima, N. Taira, Y. Hinatsu // *Solid State Communications*. — 2003. — Vol. 125. — № 6. — P. 311–315. — DOI: 10.1016/S0038-1098(02)00823-2
30. 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
31. Undalov Yu.K. Gomologicheskie serii khimicheskikh soedinenii sistemy $(\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-})$ na baze soedineniya $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$ [Homologous series of chemical compounds of the system $(\text{Ca}^{2+} - \text{Ir}^{4+} - \text{Ir}^{5+} - \text{O}^{2-})$ based on the compound $\text{Ca}_5\text{Ir}^{4+}\text{Ir}^{5+}_2\text{O}_{12}$] / Yu.K. Undalov // *CIFRA. Khimiya* [CIFRA. Chemistry]. — 2025. — № 3(6). — DOI: 10.60797/CHEM.2025.6.2 [in Russian]
32. 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