

Научная статья
УДК 661.862'027:544.452.015.2
doi: 10.17223/24135542/40/12

Исследование фазообразования в системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$

Лилия Александровна Селюнина¹,
Людмила Николаевна Мишенина², Анастасия Павловна Пицан³,
Татьяна Михайловна Ботвина⁴

1, 2, 3, 4 Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ selyuninaLA@mail.ru

² lnmishenina@gmail.com

³ nastyapican@yandex.ru

⁴ shaldyata@mail.ru

Аннотация. Значительный интерес к тройной системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ в материаловедении обусловлен уникальным сочетанием функциональных характеристик алюминатов кальция и магния. Особый научный интерес представляет проблема формирования соединения состава $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$. Его стехиометрия логично следует из структурной аналогии с хорошо изученными и широко применяемыми алюминатами бария и стронция ($\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ и $\text{SrMgAl}_{10}\text{O}_{17}$), которые демонстрируют высокую эффективность в качестве матриц для люминофоров. В научной литературе встречаются отдельные указания на возможность синтеза данного соединения, однако надежные данные, однозначно подтверждающие его стабильное существование, в настоящее время отсутствуют. В данной работе синтез алюмината кальция–магния осуществляли методом горения растворов с последующим отжигом в интервале температур 550–1300°C. Для анализа продуктов синтеза использовали термический анализ, ИК-спектроскопию и рентгенофазовый анализ с полнопрофильным уточнением методом Ритвельда. Установлено, что в исследованных условиях целевое соединение $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ не образуется в качестве термодинамически стабильной фазы. Основными продуктами высокотемпературного отжига являются гексаалюминат кальция (CaAl_2O_9), алюминат магния (MgAl_2O_4) и диалюминат кальция (CaAl_4O_7). Доля предполагаемой фазы алюмината кальция–магния не превышает 6%.

Ключевые слова: метод горения растворов, алюминат кальция–магния, фазообразование

Благодарности: Исследование проводилось при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования и науки Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-607 от 01.07.2025).

Для цитирования: Селюнина Л.А., Мишенина Л.Н., Пицан А.П., Ботвина Т.М. Исследование фазообразования в системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 40. С. 110–118. doi: 10.17223/24135542/40/12

Study of phase formation in the $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ system

Liliya A. Selyunina¹, Liudmila N. Mishenina²,
Anastasiya P. Pitsan³, Tatiana M. Botvina⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ selyuninaLA@mail.ru

² lnmishenina@gmail.com

³ nastyapican@yandex.ru

⁴ shaldyata@mail.ru

Abstract. Significant interest in the ternary $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ system in materials science is due to the unique combination of functional properties of calcium and magnesium aluminates. A particular scientific focus is the challenge of forming a compound with the composition $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$. Its stoichiometry logically follows from the structural analogy with the well-studied and widely used barium and strontium aluminates ($\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ and $\text{SrMgAl}_{10}\text{O}_{17}$), which demonstrate high efficiency as host matrices for phosphors. While there are sporadic indications in the scientific literature regarding the possibility of synthesizing this compound, reliable data unambiguously confirming its stable existence are currently lacking. In this work, calcium-magnesium aluminate was synthesized using the solution combustion method followed by annealing in the temperature range of 550–1300 °C. The synthesis products were analyzed using thermal analysis, IR spectroscopy, and X-ray phase analysis with full-profile Rietveld refinement. It was established that under the investigated conditions, the target compound $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ does not form as a thermodynamically stable phase. The main products of high-temperature annealing are calcium hexaaluminate ($\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$), magnesium aluminate (MgAl_2O_4), and calcium dialuminate (CaAl_4O_7). The content of the presumed calcium-magnesium aluminate phase does not exceed 6%.

Keywords: solution combustion method, calcium magnesium aluminate, phase formation

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2025-607 dated 01/07/2025).

For citation: Selyunina, L.A., Mishenina, L.N., Pitsan, A.P., Botvina, T.M. Study of phase formation in the $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ system. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 40, 110–118. doi: 10.17223/24135542/40/12

Введение

Оксидные соединения в тройной системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ представляют значительный фундаментальный и прикладной интерес в современных областях материаловедения, что обусловлено уникальным сочетанием химической инертности, коррозионной стойкости и функциональных свойств алуминатов щелочноземельных металлов. Эти материалы востребованы

в качестве высокоогнеупорных материалов [1, 2], матриц для люминофоров [3–8], а также компонентов функциональной керамики. Перспективным направлением является их использование в светодиодах для растениеводства, где красные люминофоры, излучающие в диапазоне 650–700 нм, оптимально соответствуют зоне поглощения хлорофиллов А и В [6].

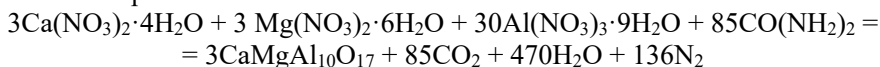
История исследования системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ насчитывает более ста лет. Первые фундаментальные работы Rankin и Merwin (1916) [9] не выявили наличия тройных соединений. Последующие эксперименты постепенно усложняли картину: Welch [10] впервые сообщил о трехкомпонентном соединении с химическим составом $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$, две новые фазы в системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ были идентифицированы Gobbels [11] и Iyi [12] и соавт., их стехиометрические составы были определены как $\text{Ca}_2\text{Mg}_2\text{Al}_{28}\text{O}_{46}$ и $\text{CaMg}_2\text{Al}_{16}\text{O}_{27}$. Логвинков и соавт. [13] экспериментально подтвердили существование метастабильного соединения $\text{Ca}_3\text{MgAl}_4\text{O}_{10}$ с чрезвычайно узким температурным интервалом устойчивости. В научной литературе встречаются отдельные указания на возможность синтеза данного соединения [3–8], однако надежные данные, однозначно подтверждающие его стабильное существование на фазовой диаграмме системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$, в настоящее время отсутствуют. Это создает значительную неопределенность в понимании термодинамической стабильности и условий формирования данной фазы, что ограничивает возможности ее целенаправленного синтеза и практического использования.

В связи с этим настоящая работа ставит своей задачей проведение комплексного экспериментального исследования для верификации возможности стабильного формирования алюмината кальция–магния состава $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$.

Методы

В качестве исходных веществ для синтеза алюмината кальция–магния методом горения растворов использовали гексагидрат нитрата магния, тетрагидрат нитрата кальция, нонагидрат нитрата алюминия, мочевины и дистиллированную воду.

При получении алюминатов методом сжигания расчет навесок исходных веществ проводили в соответствии со следующим уравнением реакций в стехиометрических соотношениях:



Образцы реагентов по отдельности растворяли в минимальном количестве дистиллированной воды. Полученные растворы сливали и сушили на песчаной бане при температуре 90°C до сиропообразного состояния. Полученный гель прокаливали в течение 15 мин при температуре 550°C. Полученный ксерогель растирали в ступке и прокаливали в муфельной печи в течение 3 ч при температуре 1300°C.

Фазообразование в тройной системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ изучали методом термического анализа с использованием прибора для термического анализа

NETZSCH STA 449C, держатель DSC (/TG) HIGH RG 4 / C, скорость нагрева 5 град./мин, атмосфера – воздух, диапазон температур 25–1 350°C. Эволюцию фазообразования алюминатов кальция и магния, полученных при температуре 1 000–1 300°C, исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РФА) на дифрактометре Rigaku MiniFlex 600 (Япония) (Cu K α -излучение, диапазон углов 2 θ 10–80°, скорость съемки 2 град./мин). Для идентификации фаз использовали базы данных PDF-2. Уточнение структуры и количественный анализ были выполнены полнопрофильным методом Ритвельда. Для полнопрофильного уточнения структуры $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ методом Ритвельда использовали CIF-файл, созданный на основе результатов, полученных Thomas и соавт. [14], это единственный файл, существующий для алюмината данного состава. Определение фазового состава проводилось с помощью программы Profex.

Результаты

Согласно данным термического анализа (рис. 1), при отжиге прекурсора синтеза $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ происходит лишь незначительная потеря массы (~ 7 мас. %). На основании этого наблюдения можно предположить, что разложение промежуточных металлсодержащих соединений с выделением летучих продуктов реакции завершается в процессе горения раствора.

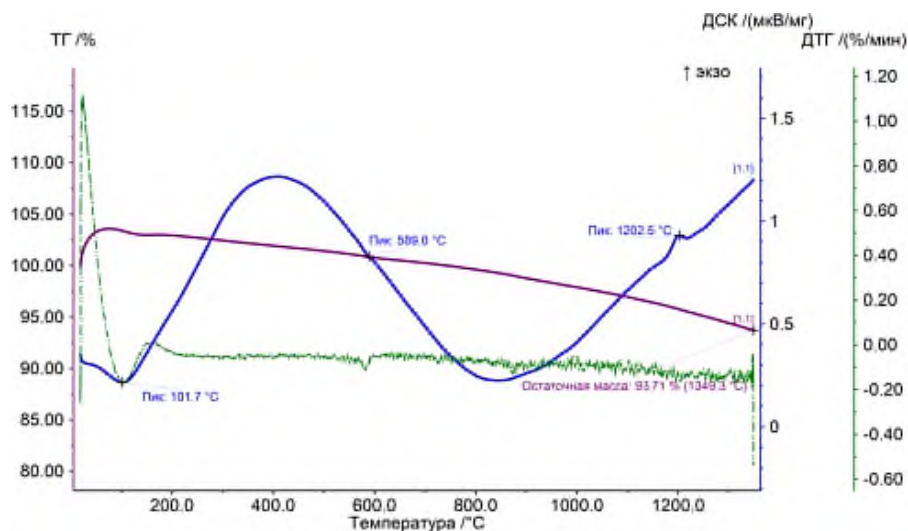


Рис. 1. Термограммы прекурсора синтеза, полученного методом горения

Наблюдаемый эндотермический эффект в диапазоне температур от 50 до 150°C соответствует удалению адсорбированной воды с поверхности прекурсора. В интервале температур 350–800°C происходит завершение процессов разложения промежуточных металлсодержащих соединений с выделением летучих продуктов реакции, что сопровождается небольшим уменьшением

массы образца. Экзотермический пик в области 1 200–1 205°C указывает на процесс формирования новой, более стабильной и упорядоченной кристаллической фазы, что приводит к выделению небольшого количества энергии. Потеря массы, наблюдаемая выше 1 000°C, вероятно, обусловлена разложением нестехиометрических оксидов, сопровождающимся образованием кислородных вакансий и выделением молекулярного кислорода в газовую фазу. Таким образом, метод термического анализа позволяет сделать вывод, что основные стадии разложения прекурсора протекают при температурах ниже 800°C, а последующий высокотемпературный отжиг необходим для завершения процессов кристаллизации и формирования целевой кристаллической структуры.

Для подтверждения образования кристаллических алюминатов при 550°C была проведена ИК-спектроскопия исследуемых образцов, полученных при различных температурах (рис. 2).

ИК-спектры образцов, полученных методом горения растворов при 550°C в течение 15 мин и с последующей термической обработкой при 1 300°C в течение 3 ч демонстрируют высокую степень сходства. Отсутствие полос поглощения, характерных для колебаний нитратных групп и N–H-связей мочевины, свидетельствует о полном протекании процессов горения и термического разложения исходных реагентов в данных условиях.

В спектре образца, отожженного при 1 300°C, наблюдается появление новой полосы в области 910–980 см^{-1} , а также увеличение структурированности полос в области 450–650 см^{-1} , что может указывать на преобладание колебаний связей Al–O в тетраэдрических фрагментах AlO_4 [15, 16]. Кроме того, наличие характерной системы полос в области 543–691–740 см^{-1} , согласно литературным данным, является признаком формирования кристаллической решетки шпинели MgAl_2O_4 [17].

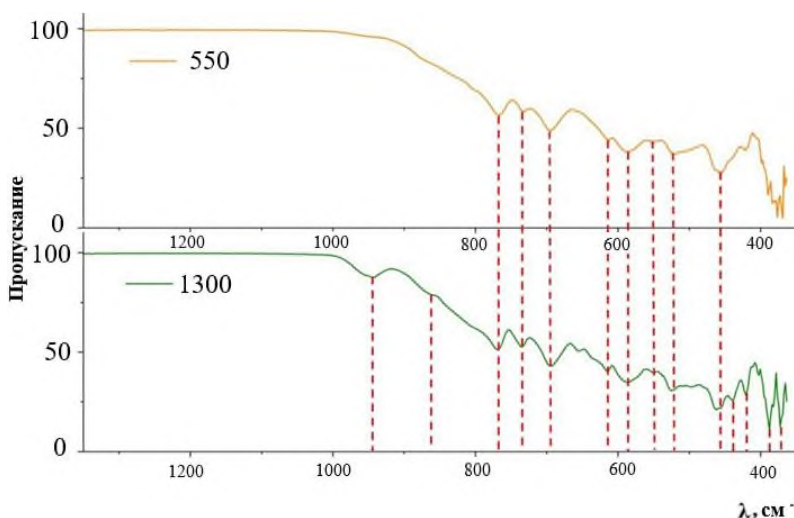


Рис. 2. ИК-спектры алюминатов кальция и магния, полученных при 550 и 1 300°C

Согласно результатам рентгенофазового анализа (таблица), образец, полученный при 550°C, является кристаллическим. Наблюдаемое уширение дифракционных максимумов свидетельствует о малом размере кристаллитов, что характерно для продуктов, синтезированных методом горения, в процессе которого интенсивное выделение газообразных продуктов препятствует росту кристаллических частиц. Идентификация фазового состава с использованием программы Profex показала, что при сжигании при 550°C в течение 15 мин формируется многофазная система, состоящая из гексаалюмината кальция, алюмината магния и оксида магния. Последующая термообработка при 1 300°C в течение 3 ч приводит к улучшению кристалличности образца, что проявляется в уменьшении ширины и увеличении интенсивности дифракционных пиков. При этом происходят исчезновение рефлексов, соответствующих оксиду магния, и образование новой фазы – диалюмината кальция. Структура CaAl₄O₇ представляет собой трехмерный каркас из тетраэдров AlO₄, что согласуется с появлением в ИК-спектрах характеристических полос поглощения, соответствующих колебаниям связей Al–O в тетраэдрических фрагментах.

Данные рентгенофазового анализа

Фазы	Пространственная группа	Параметры элементарной ячейки				ω, %	R _{wp} , %
		a, Å	b, Å	c, Å	Углы, °		
CaAl ₁₂ O ₁₉	P6 ₃ /mmc	5,5614		21,8942		γ = 120	11
MgAl ₂ O ₄	P1	5,7200	5,7280	56,0140		α = 90,13; β = 89,84; γ = 120,14	
CaAl ₄ O ₇	C2/c	12,8986	8,8870	5,4368		γ = 107,105	
CaMgAl ₁₀ O ₁₇	R3m	5,5722		33,4030		γ = 107,105	
CaAl ₁₂ O ₁₉	P6 ₃ /mmc	5,5685		21,8951		γ = 120	10
MgAl ₂ O ₄	P1	2,8192	9,3440	9,3674		α = 90,24; β = 90,90; γ = 90,69	
MgO	P1	9,0538	9,7607	10,5313		α = 94,39; β = 92,46; γ = 91,87	

Результаты полнопрофильного уточнения методом Ритвельда (см таблицу) демонстрируют хорошую сходимость с теоретическими данными (R_{wp} < 0,2; χ² < 2), при этом погрешность количественного фазового анализа не превышает 1 мас. %. Установлено, что при 550°C основными кристаллическими фазами являются оксид магния и гексаалюминат кальция, тогда как оксиды алюминия и кальция, вероятно, присутствуют в аморфном состоянии. После отжига при 1 300°C наблюдаются увеличение содержания алюмината магния и появление диалюмината кальция. При этом доля предполагаемой фазы алюмината кальция–магния не превышает 6%, что свидетельствует о термодинамической нестабильности соединения CaMgAl₁₀O₁₇ в исследуемых условиях и ставит под сомнение существование этой фазы. Причиной отсутствия целевой фазы является неспособность иона Ca²⁺ стабилизировать

структуру β -глинозема из-за малого ионного радиуса: ионный радиус Ca^{2+} (1,04 Å) существенно меньше, чем у Ba^{2+} (1,38 Å) и Sr^{2+} (1,20 Å) [18], это создает геометрические напряжения в кристаллической решетке, препятствуя стабилизации слоистой структуры β -глинозема, характерной для $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ и $\text{SrMgAl}_{10}\text{O}_{17}$.

На основании совместного анализа данных РФА и ИК-спектроскопии можно предложить, что на первой стадии происходят горение и разложение нитратов до соответствующих оксидов, на втором этапе оксиды магния и кальция реагируют с оксидом алюминия с образованием гексаалюмината магния и алюмината кальция. Низшие алюминаты не образуются из-за избытка оксида алюминия в системе. При дальнейшем повышении температуры доля алюмината магния увеличивается, оксид магния исчезает, и образуется диалюминат кальция, так как содержание оксида алюминия уже меньше, чем на начальном этапе. Затем образовавшиеся диалюминат кальция, гексаалюминат кальция и алюминат магния реагируют друг с другом, образуя алюминат кальция–магния.

Заключение

На основании проведенного комплексного экспериментального исследования можно сделать вывод, что формирование целевого соединения $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ в тройной системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ в изученных условиях не подтверждается. Основными продуктами синтеза методом горения растворов с последующим отжигом являются гексаалюминат кальция (CaAl_2O_9), алюминат магния (MgAl_2O_4) и диалюминат кальция (CaAl_4O_7). Причина невозможности стабилизации фазы $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ – малый ионный радиус Ca^{2+} , который создает геометрические напряжения в кристаллической решетке и препятствует образованию стабильной слоистой структуры β -глинозема, характерной для ее аналогов на основе бария и стронция. Данные термического анализа, ИК-спектроскопии и рентгенофазового анализа согласованно свидетельствуют о полном протекании процессов разложения прекурсоров и последующей кристаллизации термодинамически стабильных фаз, однако доля предполагаемого алюмината кальция–магния не превышает 6%.

Список источников

1. Shahraki A. et al. Performance improvement of MgO-CaO refractories by the addition of nano-sized Al_2O_3 // *Materials Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 198. P. 354–359.
2. Krasnyanskaya I.A. et al. Mechanism of MgO-C refractories corrosion interacting with $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-FeO}$ slags // *CIS Iron and Steel Review*. 2024. Vol. 27. P. 20–30.
3. Pawade V.B., Dhoble S.J. Blue emission in Eu^{2+} activated $\text{MgXAl}_{10}\text{O}_{17}$ ($\text{X} = \text{Sr}, \text{Ca}$) phosphors // *Optik – Int. J. Light Electron Opt.* 2012. Vol. 123. P. 1879–1883.
4. Anupam S. et al. Synthesis, characterization and optical properties of Ce^{3+} activated $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ phosphor // *AIP Conf. Proc.* 2014. Vol. 1591 (1). P. 1746–1747.
5. Gavrilenko E.A. et al. Study of Calcium Magnesium Aluminate $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ Formation // *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 670. P. 162–167.
6. Zhou Yu. et al. Design of Highly Efficient Deep-red Emission in Mn^{4+} Doped New-Type Structure $\text{CaMgAl}_{10}\text{O}_{17}$ for Plant Growth LED Light // *Dalton Transactions*. 2021. Vol. 50. P. 11793–11803.

7. Yifeng Y. et al. Deep-red emission in Mn⁴⁺ activated CaMgAl₁₀O₁₇ phosphor and enhanced optical photoluminescence by charge compensator of Mg²⁺ // *Optical Materials*. 2022. Vol. 132. Art. 112818.
8. Yerojwar R.M. et al. Synthesis and photoluminescence properties of CaMgAl₁₀O₁₇:Sm³⁺ phosphor for n-UV solid-state lighting // *Journal of Optics*. 2024. Vol. 53. P. 4423–4428.
9. Rankin G.A. et al. The Ternary System CaO–Al₂O₃–MgO // *J. Amer. Chem. Soc.* 1916. Vol. 38. P. 568–588.
10. Welch J.H. Ternary Compound Formation in the System CaO–Al₂O₃–MgO // *Nature*. 1961. Vol. 191. P. 559–560.
11. Gobbels M. et al. The Al–Rich Part of the System CaO–Al₂O₃–MgO. Part I. Phase Relationships // *J. Solid State Chem.* 1995. Vol. 120. P. 358–363.
12. Iyi N. et al. The Al–Rich Part of the System CaO–Al₂O₃–MgO. Part II. Structure Refinement of Two New Magnetoplumbite – Related Phases // *J. Solid State Chem.* 1995. Vol. 120. P. 364–371.
13. Логвинков С.М. и др. Экспериментальная проверка стабильности тройного соединения Ca₃MgAl₄O₁₀ и триангуляции системы CaO–MgO–Al₂O₃ // *Огнеупорные материалы*. 2007. № 3. С. 14–18.
14. Thomas J.O. et al. The relationship between structure and ionic conductivity in divalent beta-aluminas // *Solid State Ionics*. 1983. Vol. 9. P. 301–306.
15. Yi Wu et al. Crystal structure, vibrational spectroscopy, and microwave dielectric properties of CaAl₄O₇ ceramics with low permittivity // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020. Vol. 31. P. 4520–4526.
16. Sibel O. et al. Development of high luminous efficacy red-emitting CaAl₁₂O₁₉:Mn phosphor using Al- and K-doped ZnO NWs/CFs // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2023. Vol. 34 (16). Art. 1267.
17. Goliev E.V. Infrared reflection and transmission spectra of MgAl₂O₄ ceramic spinel // *Journal of Applied Spectroscopy*. 2020. Vol. 87 (3). P. 471–475.
18. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. 2-е изд. М. : Химия, 1978. 392 с.

References

1. Shahraki A. et al. Performance improvement of MgO–CaO refractories by the addition of nano-sized Al₂O₃. *Materials Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 198. P. 354–359.
2. Krasnyanskaya I.A. et al. Mechanism of MgO–C refractories corrosion interacting with CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂–FeO slags. *CIS Iron and Steel Review*. 2024. Vol. 27. P. 20–30.
3. Pawade V.B., Dhoble S.J. Blue emission in Eu²⁺ activated MgXAl₁₀O₁₇ (X = Sr, Ca) phosphors. *Optik – Int. J. Light Electron Opt.* 2012. Vol. 123. P. 1879–1883.
4. Anupam S. et al. Synthesis, characterization and optical properties of Ce³⁺ activated CaMgAl₁₀O₁₇ phosphor. *AIP Conf. Proc.* 2014. Vol. 1591 (1). P. 1746–1747.
5. Gavrilenko E.A. et al. Study of Calcium Magnesium Aluminate CaMgAl₁₀O₁₇ Formation. *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 670. P. 162–167.
6. Zhou Yu. et al. Design of Highly Efficient Deep-red Emission in Mn⁴⁺ Doped New-Type Structure CaMgAl₁₀O₁₇ for Plant Growth LED Light. *Dalton Transactions*. 2021. Vol. 50. P. 11793–11803.
7. Yifeng Y. et al. Deep-red emission in Mn⁴⁺ activated CaMgAl₁₀O₁₇ phosphor and enhanced optical photoluminescence by charge compensator of Mg²⁺. *Optical Materials*. 2022. Vol. 132. Art. 112818.
8. Yerojwar R.M. et al. Synthesis and photoluminescence properties of CaMgAl₁₀O₁₇:Sm³⁺ phosphor for n-UV solid-state lighting. *Journal of Optics*. 2024. Vol. 53. P. 4423–4428.
9. Rankin G.A. et al. The Ternary System CaO–Al₂O₃–MgO. *J. Amer. Chem. Soc.* 1916. Vol. 38. P. 568–588.
10. Welch J.H. Ternary Compound Formation in the System CaO–Al₂O₃–MgO. *Nature*. 1961. Vol. 191. P. 559–560.

11. Gobbels M. et al. The Al–Rich Part of the System CaO–Al₂O₃–MgO. Part I. Phase Relationships. *J. Solid State Chem.* 1995. Vol. 120. P. 358–363.
12. Iyi N. et. al. The Al–Rich Part of the System CaO–Al₂O₃–MgO. Part II. Structure Refinement of Two New Magnetoplumbite – Related Phases. *J. Solid State Chem.* 1995. Vol. 120. P. 364–371
13. Logvinkov, S.M. et al. Eksperimental'naya proverka stabil'nosti troynogo soedineniya Ca₃MgAl₄O₁₀ i triangulyatsii sistemy CaO–MgO–Al₂O₃ [Experimental verification of the stability of the ternary compound Ca₃MgAl₄O₁₀ and triangulation of the CaO–MgO–Al₂O₃ system]. *Ogneupornye materialy*, 2007, No. 3, pp. 14–18.
14. Thomas J.O. et. al. The relationship between structure and ionic conductivity in divalent beta-aluminas. *Solid State Ionics.* 1983. Vol. 9. P. 301–306.
15. Yi Wu et al. Crystal structure, vibrational spectroscopy, and microwave dielectric properties of CaAl₄O₇ ceramics with low permittivity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* 2020. Vol. 31. P. 4520–4526.
16. Sibel O. et al. Development of high luminous efficacy red-emitting CaAl₁₂O₁₉:Mn phosphor using Al- and K-doped ZnO NWs/CFs. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* 2023. Vol. 34 (16). Art. 1267.
17. Goliev E.V. Infrared reflection and transmission spectra of MgAl₂O₄ ceramic spinel. *Journal of Applied Spectroscopy.* 2020. Vol. 87 (3). P. 471–475.
18. Rabanovich, V.A., Khavin, Z.Ya. Kratkiy khimicheskiy spravochnik [Brief Chemical Handbook]. 2nd ed. Moscow: Khimiya, 1978. 392 p.

Сведения об авторах:

Селюнина Лилия Александровна – кандидат химических наук, доцент кафедры неорганической химии химического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: SelyuninaLA@mail.ru

Мишенина Людмила Николаевна – кандидат химических наук, доцент Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: Inmishenina@gmail.com

Пицан Анастасия Павловна – магистрант Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: nastypican@yandex.ru

Ботвина Татьяна Михайловна – кандидат химических наук, младший научный сотрудник отдела «Новые материалы для электротехнической и химической промышленности», доцент кафедры неорганической химии химического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shaldyata@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Selyunina Liliya A. – Candidate of Chemical Science, Associate Professor at the Department of Inorganic Chemistry, Chemical Faculty, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: SelyuninaLA@mail.ru;

Mishenina Liudmila N. – Candidate of Chemical Science, Docent, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: Inmishenina@gmail.com

Pitsan Anastasia P. – Master's Student, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: nastypican@yandex.ru

Botvina Tatiana M. – Candidate of Chemical Science, Junior Researcher at the Department of New Materials for the Electrotechnical and Chemical Industries, Associate Professor at the Department of Inorganic Chemistry, Chemical Faculty, Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: shaldyata@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.11.2025; принята к публикации 03.12.2025
The article was submitted 06.11.2025; accepted for publication 03.12.2025