

УДК 544.344.015.032.1.032.4

**ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПЕРОВСКИТОПОДОБНЫХ ФАЗ
В СИСТЕМЕ $GdAlO_3-SrO$** © 2024 г. Попова В. Ф.¹, Тугова Е. А.^{2*}¹Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН
Россия, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2²Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
Россия, 194071, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

*e-mail: katugova@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024

После доработки 08.04.2024

Принята к публикации 16.04.2024

Приводятся результаты исследования разреза $GdAlO_3-SrO$, который является одним из внутренних сечений тройной системы $Gd_2O_3-SrO-Al_2O_3$. В разрезе $GdAlO_3-SrO$ синтезировано три тройных соединения — $Gd_2SrAl_2O_7$, $GdSrAlO_4$, $GdSr_2AlO_5$, кристаллизующихся в тетрагональной сингонии. Систематизированы данные о механизме их твердофазного образования. Представлены результаты термической устойчивости перовскитоподобных фаз в системе $GdAlO_3-SrO$ в широком интервале температур 1100–1800°C на воздухе. Установлен конгруэнтный характер плавления сложных оксидов $Gd_2SrAl_2O_7$, $GdSrAlO_4$, $GdSr_2AlO_5$, и определены их температуры плавления.

Ключевые слова: сложные алюминаты, высокотемпературные оксиды, твердофазный синтез, температура плавления.

DOI: 10.31857/S0132665124020071, EDN: QYORVU

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений развития современной химии являются синтез и изучение неорганических соединений, которые могут быть основой высокотемпературных керамических материалов, обладающих ценными электрофизическими, оптическими, каталитическими и другими свойствами. В связи с этим матрицы-хозяева на основе сложных алюминатов представляют огромный фундаментальный и практический интерес, поскольку обладают большой химической стабильностью и экологической безопасностью. К числу перспективных материалов для создания высокотемпературной керамики, обладающих ценными физическими свойствами (электрическими, магнитными и т.п.), относятся сложные перовскитоподобные алюминаты $Ln_2SrAl_2O_7$, $LnSrAlO_4$, $LnSr_2AlO_5$, $LnSrAl_3O_7$, формирующиеся в системах $Ln_2O_3-SrO-Al_2O_3$ ($Ln = PЗЭ$) [1–8].

К настоящей моменту в литературе имеются отрывочные сведения об образовании и термической устойчивости четырех тройных соединений $Gd_2SrAl_2O_7$, $GdSrAlO_4$, $GdSr_2AlO_5$ и $GdSrAl_3O_7$, формирующихся в системе $Gd_2O_3-SrO-Al_2O_3$. Наиболее подробно изучено соединение $Gd_2SrAl_2O_7$ [3, 4, 9–12]. Сложный оксид $Gd_2SrAl_2O_7$ синтезирован после двухчасовой выдержки при температуре

1400°C [10]. Механизм и кинетика формирования последнего подробно описаны в работе [10]. Соединение является устойчивым от комнатной температуры до температуры плавления, что установлено по отсутствию изменений в составе образцов, подвергнутых изотермическому отжигу. Образование $Gd_2SrAl_2O_7$ происходит через промежуточное соединение $SrAl_2O_4$. Лимитирующая реакция: $Gd_2O_3 + SrAl_2O_4 = Gd_2SrAl_2O_7$. Соединение $Gd_2SrAl_2O_7$ кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки: $a = 3.7052 \text{ \AA}$, $c = 19.781 \text{ \AA}$, $d_{\text{выщ}} = 6.94 \text{ г/см}^3$, $d_{\text{изм}} = 6.92 \text{ г/см}^3$, пр.гр. I4/mmm, структурный тип $Sr_3Ti_2O_7$ и принадлежит к фазам Руддлесдена — Поппера [13]. Построена диаграмма состояния системы Gd_2O_3 — $SrAl_2O_4$ [11]. Установлено, что в системе существует одно тройное соединение с мольным отношением $GdAlO_3 : SrO = 2 : 1$ ($Gd_2SrAl_2O_7$), температура плавления которого равна 1780°C, характер плавления — конгруэнтный. По данным [6], плавление нанокристаллов $Gd_2SrAl_2O_7$ фиксируется при 1500°C.

Сведения о других соединениях — $GdSrAlO_4$, $GdSr_2AlO_5$ и $GdSrAl_3O_7$ отрывочны. Соединение $GdSrAlO_4$ ($GdAlO_3 : SrO = 1 : 1$) в гомогенном виде получено нагреванием на воздухе стехиометрической смеси оксидов Gd_2O_3 , Al_2O_3 и карбоната стронция $SrCO_3$ при 1500°C (3 ч) [14] или, по данным работы [15], при температуре 1400°C (выдержка 15 ч). Механизм образования $GdSrAlO_4$ подробно рассмотрен в [15]. Промежуточными продуктами взаимодействия компонентов исходной смеси при синтезе $GdSrAlO_4$ являются алюминаты стронция $SrAl_2O_4$ и $Sr_3Al_2O_6$. Лимитирующую стадию твердофазного взаимодействия оксидов Gd_2O_3 , $SrCO_3$, Al_2O_3 , приводящую к образованию целевого продукта, можно представить: $\frac{1}{2} Gd_2O_3 + \frac{1}{4} SrAl_2O_4 + \frac{1}{4} Sr_3Al_2O_6 = GdSrAlO_4$. Соединение кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки: $a = 3.695$, $c = 12.36 \text{ \AA}$, пр.гр. I4/mmm, структурный тип K_2NiF_4 .

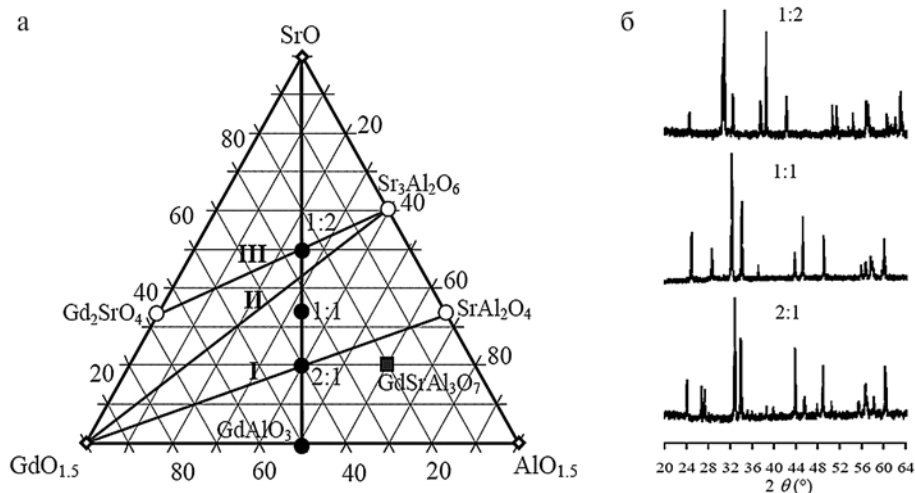


Рис. 1: а) схема субсолидусных отношений в разрезе $GdAlO_3$ — SrO системы $GdO_{1.5}$ — SrO — $AlO_{1.5}$. I, II, III — линии, показывающие лимитирующие реакции формирования $Gd_2SrAl_2O_7$, $GdSrAlO_4$, $GdSr_2AlO_5$; б) рентгеновские дифрактограммы соединений $Gd_2SrAl_2O_7$ (2:1) [76—0095], $GdSrAlO_4$ (1:1) [24—1185], $GdSr_2AlO_5$ (1:2) [70—2197] разреза $GdAlO_3$ — SrO .

*Все приведенные на рис. 1б рентгеновские рефлексы соответствуют дифракционным максимумам однофазных продуктов.

[*_*] — номер записи картотеки базы данных ICDD.

По данным [16], соединение $GdSr_2AlO_5$ синтезировано обжигом эквимольной смеси $SrCO_3$, Gd_2O_3 и Al_2O_3 с промежуточным перетиранием при $1400^\circ C$. Согласно [17], оксид $GdSr_2AlO_5$ получен при $1600^\circ C$ в течение 4 ч. По данным авторов [18], монокристаллы $LnSr_2AlO_5$ ($Ln = P3Э$) имеют форму вытянутых пластин.

Как известно из литературы [19], в разрезе $GdAlO_3$ - $SrAl_2O_4$ тройной системы (рис. 1а) существует еще одно соединение $GdSrAl_3O_7$ (на рис. 1а отмечено квадратом), полученное из смеси оксидов при нагревании 1650 – $1700^\circ C$. Соединение кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки: $a = 7.801$, $c = 5.132 \text{ \AA}$, $Z = 2$, $d_{\text{выч}} = 4.694 \text{ г/см}^3$, пр.гр. $P42_1m$, структурный тип геленита $Ca_2Al_2SiO_7$.

В связи с отсутствием данных о термическом поведении перечисленных выше соединений цель настоящего исследования, являющегося продолжением серии работ по изучению фазовых равновесий в системах тугоплавких оксидов [11, 20–23], заключается в определении термической устойчивости сложных перовскитоподобных алюминатов, формирующихся в частном разрезе $GdAlO_3$ – SrO тройной системы Gd_2O_3 – SrO – Al_2O_3 в широком интервале температур.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы в системе $GdAlO_3$ – SrO получены методом твердофазного синтеза. Для приготовления исходных смесей использовались следующие реактивы: Gd_2O_3 (содержание основного компонента — 99.99%), тонкодисперсного Al_2O_3 (содержание основного компонента — 99.99%, размер частиц — 1–15 мкм) и $SrCO_3$ (квалификация «о.с.ч.»). Термообработку спрессованных под давлением 500 МПа исходных смесей осуществляли ступенчато в интервале температур 1100 – $1500^\circ C$ на воздухе. Продолжительность изотермической выдержки варьировали в пределах 0.5–24 ч.

Фазовый состав продуктов обжига устанавливали методом рентгенофазового анализа (РФА). Съемку рентгеновских дифрактограмм осуществляли на дифрактометре ДРОН-3 (CuK_α -излучение, Ni-фильтр). Идентификацию фаз осуществляли с использованием комплекса PDWin 4.0 и базы порошковых дифракционных данных PDF2.

Определение температур плавления перовскитоподобных фаз в системе $GdAlO_3$ – SrO осуществляли методом визуально-термического анализа на высокотемпературном микроскопе (ВТМ) с иридиевым держателем образца [24]. Исследование проводили на воздухе $P_{O_2} = 0.21 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Погрешность определения температуры не превышала $15^\circ C$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены данные рентгенофазового анализа образцов, полученных термической обработкой исходной смеси при $1300^\circ C$ и $1400^\circ C$ в течение 5 ч. Согласно приведенным на рис. 2 данным, наряду с образованием $GdSr_2AlO_5$ фиксируются фазы $Sr_3Al_2O_6$ и Gd_2SrO_4 , кристаллизующиеся в структурных типах $Sr_3Ti_2O_7$ и $CaFe_2O_4$, имеющих близкое строение [25].

Данные рентгенофазового анализа образцов $GdSr_2AlO_5$, полученных термообработкой в интервале температур 1300 – $1500^\circ C$ (рис. 1б, рис. 2), указывают, что лимитирующей реакцией при формировании этого соединения является реакция

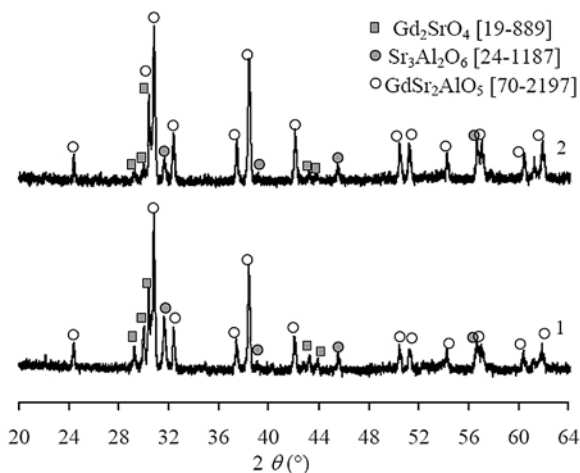


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы $GdSr_2AlO_5$, иллюстрирующие многостадийность твердофазного синтеза соединения при $1300^\circ C$ (1) и $1400^\circ C$ (2) в течение 5 ч на воздухе.

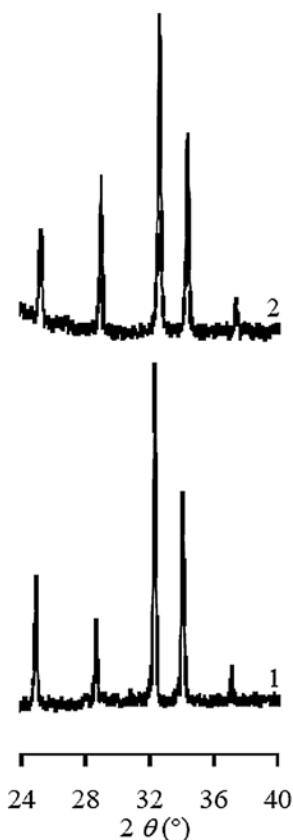


Рис. 3. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм $GdSrAlO_4$: 1 — до плавления (исходный образец); 2 — после плавления (закалка).

*Все приведенные на рис. 3 рентгеновские рефлексы соответствуют дифракционным максимумам $GdSrAlO_4$.

$\frac{1}{2} \text{Gd}_2\text{SrO}_4 + \frac{1}{2} \text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = \text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ (линия III). Однородность образца доказывается представленной на рис. 1б рентгеновской дифрактограммой соединения $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ после обжига при 1500°C . Рентгеновские дифрактограммы $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ и соединений типа $\text{LnSr}_2\text{AlO}_5$ ($\text{Ln} = \text{La} - \text{Eu}$) обнаруживают хорошее соответствие, что свидетельствует о структурном подобии $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ с изотипным по составу алюминатом — $\text{EuSr}_2\text{AlO}_5$ [18]. $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ кристаллизуется в тетрагональной сингонии с параметрами решетки: $a = 6.704 \text{ \AA}$, $c = 10.989 \text{ \AA}$, пр.гр. $I4/mcm$ в структурном типе Cs_3CoCl_5 .

Схема субсолидусных отношений в системе $\text{GdAlO}_3\text{—SrO}$ представлена на рис. 1а. Согласно рассмотренным выше данным, все три соединения GdSrAlO_4 , $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ и $\text{Gd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ получены методом твердофазных химических реакций при $1400\text{—}1500^\circ\text{C}$. Твердофазная реакция в зависимости от стехиометрического состава соединения протекает через образование промежуточных фаз: Gd_2SrO_4 и алюминатов стронция SrAl_2O_4 и $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$.

На рис. 3 приведена рентгеновская дифрактограмма оксида GdSrAlO_4 , полученного при серии последовательных обжигов на воздухе при 1400°C (1) исходной шихты, соответствующей стехиометрии GdSrAlO_4 , и в дальнейшем подвергнутого термическому воздействию на высокотемпературном микроскопе. Конгруэнтный характер плавления GdSrAlO_4 установлен методом рентгенофазового анализа образца GdSrAlO_4 (2), закаленного от температуры плавления. Температура плавления GdSrAlO_4 составила 1640°C . Соединение $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$, как было определено методом визуально-термического анализа с проведением последующего рентгенофазового анализа, плавится конгруэнтно при 1670°C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена термическая устойчивость перовскитоподобных фаз в сечении $\text{GdAlO}_3\text{—SrO}$ тройной системы $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{—SrO—Al}_2\text{O}_3$. В псевдобинарном разрезе установлено три тройных соединения: GdSrAlO_4 , $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ и $\text{Gd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$. Все три соединения, GdSrAlO_4 , $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ и $\text{Gd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$, получены методом твердофазных химических реакций при $1400\text{—}1500^\circ\text{C}$. Твердофазная реакция в зависимости от стехиометрического состава соединения протекает через образование промежуточных фаз: Gd_2SrO_4 и алюминатов стронция SrAl_2O_4 и $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$.

Все три соединения GdSrAlO_4 , $\text{GdSr}_2\text{AlO}_5$ и $\text{Gd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ устойчивы до температур конгруэнтного плавления, что установлено методом РФА-образцов, закаленных от температуры плавления. Температуры плавления существующих в системе $\text{GdAlO}_3\text{—SrO}$ перовскитоподобных фаз соответственно равны 1640 , 1670 и 1780°C . Изоструктурные неодимсодержащие фазы NdSrAlO_4 , $\text{NdSr}_2\text{AlO}_5$ и $\text{Nd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ плавятся при более высоких температурах: 1740 , 1680 и 1825°C [21, 26] соответственно. Таким образом, можно отметить тенденцию к снижению температур плавления соединений, формирующихся в разрезах $\text{LnAlO}_3\text{—SrO}$ ($\text{Ln} = \text{Nd}, \text{Gd}$), при переходе от Nd к Gd .

Работа выполнена в рамках темы «Материалы нового поколения для инновационного развития энергетики № 1023032900322-9-1.4.3» госзадания ИХС РАН при поддержке Минобрнауки России.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В. В. Гусарову за поддержку исследований в области изучения фазовых равновесий тугоплавких оксидных систем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bao A., Tao C., Yang H.* Luminescent properties of nanoparticles $\text{LaSrAl}_3\text{O}_7$: RE^{3+} ($\text{RE} = \text{Eu}, \text{Tb}$) via the citrate sol-gel method // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2008. V. 19. P. 476–481.
2. *Zhang C., Yi L., Chen X.* Improvement of microwave dielectric characteristics in SrNdAlO_4 ceramics by Ca-substitution // *Ceramics International.* 2014. V. 40. P. 6077–6082.
3. *Yuan J., Dong S., Jiang J., Deng L., Cao X.* High-temperature corrosion behaviour of plasma sprayed $\text{Gd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ coatings by V_2O_5 at 700–1200 °C // *Corrosion Science.* 2022. V. 197. P. 110032.
4. *Yuan F., Liao W., Huang Y., Zhang L., Sun S., Wang Y., Lin Z., Wang G., Zhan G.* A new 1 μm laser crystal Nd: $\text{Gd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$: growth, thermal, spectral and lasing properties // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51 (12). P. 125307.
5. *Feng J., Xiao B., Zhou R., Pan W., Clarke D. R.* Anisotropic elastic and thermal properties of the double perovskite slab-rock salt layer $\text{Ln}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$ or Dy) natural superlattice structure // *Acta Materialia.* 2012. V. 60. P. 3380–3392.
6. *Chahar S., Devi R., Dalal M., Bala M., Dalal J., Boora P., Taxak V. B., Lather R., Khatkar S. P.* Color tunable nanocrystalline $\text{SrGd}_2\text{Al}_2\text{O}_7$: Tb^{3+} phosphor for solid state lighting // *Ceramics International.* 2019. V. 45. Is. 1. P. 606–613.
7. *García C. R., Oliva J., Díaz-Torres L. A.* Photocatalytic activity of $\text{LaSr}_2\text{AlO}_5$: Eu ceramic powders // *Photochem Photobiol.* 2015. V. 91. P. 505–509.
8. *Li A. H., Ionescu M., Wang X. L., Dou S. X., Wang H.* RESrAlO_4 ($\text{RE} = \text{Nd}$ and La): a new type of perovskite ceramic substrate for Bi–Sr–Ca–Cu–O superconducting thick films // *Journal of Alloys and Compounds.* 2002. V. 333. Is. 1–2. P. 179–183.
9. *Fava J., Le Flem G.* Les phases $\text{SrLa}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ et $\text{SrGd}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ // *Mat. Res. Bull.* 1975. V. 10. № 1. P. 75–80.
10. *Зверева И. А., Попова В. Ф., Миссюль А. Б., Тойкка А. М., Гусаров В. В.* Кинетика образования фаз Руддлсдена — Поппера. III. Механизм формирования $\text{Gd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ // *Журн. общей химии.* 2003. Т. 73. Вып. 5. С. 724–728. [*Zvereva I. A., Popova V. F., Missyul A. B., Toikka A. M., Gusarov V. V.* Kinetics of Ruddlesden-Popper phase formation: III. Mechanism of $\text{Gd}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ formation // *Russian Journal of General Chemistry.* 2003. 73(5). P. 684–688.]
11. *Зверева И. А., Попова В. Ф., Тугова Е. А., Пылкина Н. С., Гусаров В. В.* Фазовые равновесия в системе Gd_2O_3 – SrAl_2O_4 // *Физика и химия стекла.* 2005. Т. 31. № 6. С. 1112–1116. [*Zvereva I. A., Pylikina N. S., Popova V. F., Tugova E. A., Gusarov V. V.* Phase equilibria in the Gd_2O_3 – SrAl_2O_4 system // *Glass Physics and Chemistry.* 2005. V. 31. № 6. P. 808–811.]
12. *Feng J., Wan Ch., Xiao B., Zhou R., Pan W., Clarke D. R.* Calculation of the thermal conductivity of $\text{L}_2\text{SrAl}_2\text{O}_7$ ($\text{L} = \text{La}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}$) // *Phys. Rev. B.* 2011. V. 84. P. 024302.
13. *Ruddlesden S. N., Popper P.* The compound $\text{Sr}_3\text{Ti}_2\text{O}_7$ and its structure // *Acta Crystallogr.* 1958. V. 11. № 1. P. 54–55.
14. *Fava J., Oudalov Y. P., Reau J.-M., Le Flem G., Hagenmuller P.* Sur une nouvelle famille d'alluminates double de strontium ou d'europium divalent et de terres rares // *Compt. Rend.* 1972. V. C274. № 22. P. 1837–1839.

15. *Tugova E. A.* New DySrAlO₄ compound synthesis and formation process correlations for LnSrAlO₄ (Ln = Nd, Gd, Dy) series // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2016. № 29 (5). P. 450–456.
16. *Drofenik M., Zupan J., Kolar D., Volavšek B.* Magnetic and crystallographic investigations of some rare earth ferrite compounds // *Zeitschrift für Naturforschung B*. 1974. V. 29. № 5–6. P. 318–319.
17. *Honga W. T., Yanga H. K., Jeong J. H.* Fine yellow GdSr₂AlO₅: Ce³⁺ phosphor for white LEDs prepared by high energy ball milling process // *Ceramics International*. 2016. V. 42. P. 4594–4599.
18. *Drofenik M., Golič L.* Refinement of the Sr₂EuFeO₅ and Sr₂EuAlO₅ structures // *Acta Crystallogr.* 1979. V. B35. № 5. P. 1059–1062.
19. *Исмаатов А. А.* Рентгеновский анализ алюминатов, содержащих редкоземельные элементы // *Ж. структ. химии*. 1968. Т. 9. № 6. С. 1099–1100. [*Ismatov A. A.* X-ray analysis of aluminates containing rare earth elements // *Zh. str. chemistry*. 1968. V. 9. N. 6. P. 1099–1100. In Russian.]
20. *Zvereva I. A., Tugova E. A., Popova V. F., Silyukov O. I., Minich I. A.* The impact of Nd³⁺/La³⁺ substitution on the cation distribution and phase diagram in the La₂SrAl₂O₇-Nd₂SrAl₂O₇ system // *Chimica Techno Acta*. 2018. V. 5. № 1. P. 80–85.
21. *Е. А. Тугова.* Фазовые трансформации в системе Nd₂SrAl₂O₇ –Nd₂SrFe₂O₇ // *ЖХХ*. 2022. Т. 67. № 6. С. Пп. 809–816. [Tugova E. A. Phase Transformations in the Nd₂SrAl₂O₇–Nd₂SrFe₂O₇ system // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2022. V. 67. № 6. P. 874–880.]
22. *Попова В. Ф., Тугова Е. А.* Термическая устойчивость сложных алюминатов в системе La₂SrAl₂O₇–Ho₂SrAl₂O₇ // *ЖХХ*. 2023. Т. 68. № 10. С. 1485–1490. [Popova V. F., Tugova E. A. Thermal stability of complex aluminates in the La₂SrAl₂O₇–Ho₂SrAl₂O₇ system // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2023. V.68. № 10. P. 1482–1486.]
23. *Bechta S. V., Krushinov E. V., Almjashv V. I., Vitol S. A., Mezentsseva L. P., Petrov Yu. B., Lopukh D. B., Khabensky V. B., Barrachin M., Hellmann S., Froment K., Fischer M., Tromm W., Bottomley D., Defoort F., Gusarov V. V.* Phase diagram of the UO₂–FeO_{1+x} system // *J. Nucl. Mater.* 2007. V. 362. № 1. P. 46–52.
24. *Торопов Н. А., Келер Э. К., Леонов А. И. и др.* Высокотемпературный микроскоп // *Вестник АН СССР*. 1962. № 3. С. 46. *Toropov N. A., Koehler E. K., Leonov A. I. et al.* // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR*. 1962. № 3. P. 46. In Russian.
25. *Киселева Н. Н., Столяренко А. В., Рязанов В. В., Сенько О. В., Докукин А. А.* Прогнозирование новых соединений состава A³⁺B³⁺C²⁺O₄ // *ЖХХ*. 2017. Т. 62. № 8. С. 1068–1077. [Kiseleva N. N., Stolyarenko A. V., Ryzanov V. V., Sen'ko O. V., Dokukin A. A. Prediction of new A³⁺B³⁺C²⁺O₄ compounds // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2017. V. 62. № 8. P. 1058–1066.]
26. *Удалов Ю. П., Сальмон Р., Бондарь И. А.* Система SrO-Nd₂O₃-Al₂O₃ // *Журн. неорг. химии*. 1976. Т. 21. № 2. С. 541–546. [Udalov Y., Salmon R., Bondar I. A. SrO-Nd₂O₃-Al₂O₃ system // *Russ. J. Inorg. Chem. (Engl. Transl.)*. 1976. V. 21. P. 541–546.]