

Научная статья
УДК 54.057:546.284 + 54.061
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.003

ФОРМИРОВАНИЕ ОРТОСИЛИКАТОВ ЦИНКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА, ОСНОВАННОГО НА ПРИМЕНЕНИИ ГИДРОСИЛИКАГЕЛЯ, ВЫДЕЛЕННОГО ИЗ СЕРПЕНТИНОВЫХ МИНЕРАЛОВ

Айк Александрович Бегларян¹, Анна Рафаэловна Исаакян², Анна Миграновна Терзян³, Ншан Оганесович Зулумян⁴

^{1, 2, 3, 4}*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Армении, Ереван, Армения*

¹*Hayk_b@ysu.am, <https://orcid.org/0000-0001-9546-258X>*

²*Isahakyanannayahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-5009-8622>*

³*AnnaMir1985@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8243-5451>*

⁴*Zulumnshan@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6433-4235>*

Аннотация

Исследуется образование полиморфных модификаций ортосиликата цинка — β -Zn₂SiO₄ и α -Zn₂SiO₄ — при термообработке интермедиантов, осажденных посредством взаимодействия в водной среде между гидросиликагелем, выделенным из серпентиновых минералов (Mg(Fe))₆[Si₄O₁₀](OH)₈, гидроксидом натрия NaOH и хлоридом цинка ZnCl₂. Установлено, что в зависимости от условий, при которых осуществляется перемешивание при атмосферном давлении исходных реагентов, в полученных интермедиантах при нагреве кристаллизация β -Zn₂SiO₄ и α -Zn₂SiO₄ протекает по-разному.

Ключевые слова:

серпентин, гидросиликагель, осаждение, термообработка, β -Zn₂SiO₄ и α -Zn₂SiO₄

Благодарности:

исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке Республики Армения в рамках научных проектов № 21SCG-1D013 и № 21T-1D131.

Для цитирования:

Формирование ортосиликатов цинка в зависимости от условий синтеза, основанного на применении гидросиликагеля, выделенного из серпентиновых минералов / А. А. Бегларян [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2 С. 22–27. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.003

Original article

THE FORMATION OF ZINC ORTHOSILICATE SPECIES DEPENDING ON THE CONDITIONS OF SYNTHESIS BASED ON THE USE OF HYDROSILICA GEL DERIVED FROM SERPENTINE MINERALS

Hayk A. Beglaryan¹, Anna R. Isahakyan², Anna M. Terzyan³, Nshan H. Zulumyan⁴

^{1, 2, 3, 4}*Institute of General and Inorganic Chemistry of NAS of RA, Yerevan, Armenia*

¹*Hayk_b@ysu.am, <https://orcid.org/0000-0001-9546-258X>*

²*Isahakyanannayahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-5009-8622>*

³*AnnaMir1985@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8243-5451>*

⁴*Zulumnshan@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6433-4235>*

Abstract

In the paper the formation of zinc orthosilicate polymorphic modifications, namely, β -Zn₂SiO₄ and α -Zn₂SiO₄, has been investigated during the heat treatment of the intermediants precipitated via the interaction between hydrosilica gel which is derived from serpentine minerals (Mg(Fe))₆[Si₄O₁₀](OH)₈, sodium hydroxide NaOH and zinc chloride ZnCl₂ in aqueous medium. It has been revealed that the crystallization of β -Zn₂SiO₄ and α -Zn₂SiO₄ in the formed intermediates proceeds differently depending on the conditions of the initial reagents stirring performed in air at ambient pressure.

Keywords:

serpentine, hydrosilica gel, precipitation, heat treatment, β -Zn₂SiO₄, α -Zn₂SiO₄

Acknowledgments:

the study was prepared with the support of the Science Committee of the Republic of Armenia on research topics No. 21SCG-1D013 and No. 21T-1D131.

For citation:

The formation of zinc orthosilicate species depending on the conditions of synthesis based on the use of hydrosilica gel derived from serpentine minerals / H. A. Beglaryan [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 2. P. 22–27. doi: 10.37614/2949-1215.2023.14.2.003

Благодаря своей химической и термической стойкости, одна из полиморфных модификаций ортосиликата цинка, а именно виллемит $\alpha\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$, широко используется в качестве основного компонента для получения ряда полезных материалов, применяемых в качестве люминофоров, электроизоляционных материалов, адсорбентов, стеклокерамики, пигментов, обладающих высокой интенсивностью цвета, и глазурей [1–5]. Вторая низкотемпературная модификация $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ из-за своей нестабильности мало изучена и находит меньшее практическое применение [6, 7].

Традиционный твердофазный синтез ортосиликата цинка и материалов на его основе осуществляется путем многочасового взаимодействия оксида цинка ZnO с диоксидом кремния SiO_2 при высоких температурах (1200 °C и выше) [2, 8, 9]. Предлагаются также двухстадийные способы, основанные на получении промежуточной твердой фазы в жидкой среде путем взаимодействия солей цинка с кремнеземсодержащим реагентом, и дальнейшем обжиге полученных интермедиантов [1, 6]; а также гидротермальный метод [4, 5]. Однако все эти методы, как правило, отличаются технологической сложностью, требуют большого расхода энергии и очень часто подразумевают выделение нежелательных газов.

В последнее время для повышения эффективности производства усилия ученых всего мира направлены на расширение сырьевой базы исходных компонентов с вовлечением различных промышленных продуктов или отходов производства [3, 9].

Принимая во внимание требование времени, нами были начаты работы по получению различных силикатных соединений на основе гидросиликагеля, являющегося одним из сопутствующих продуктов при получении соединений магния из серпентиновых минералов $(\text{Mg}(\text{Fe}))_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, являющихся основным составляющим серпентинитов [10–12]. По сути, гидросиликагель, содержащий до 7 % SiO_2 , является конденсатом кремниевых кислот, образованных из силикатных анионов различной сложности (орто- $[\text{SiO}_4]^{4-}$, ди- $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$, три- $[\text{Si}_3\text{O}_{10}]^{8-}$ и т. п.), в свою очередь, выделенных выщелачиванием из структуры дегидратированного серпентина с помощью нового подхода к кислотной обработке серпентинитов [13]. В отличие от известных традиционных форм диоксида кремния, SiO_2 данного гидросиликагеля отличается более высокой химической активностью, обусловленной наличием ненасыщенных $\text{Si}-\text{O}(\text{Si})$ связей в его структуре и развитой поверхностью [14, 15].

Наши недавние исследования показали, что данный гидросиликагель может не только успешно применяться в качестве источника SiO_2 для получения силикатов кальция, стронция и бария при низких температурах, но и значительно упростить процедуру их получения методом осаждения в жидкой среде. Накопленные экспериментальные результаты позволили разработать новые методики, обеспечивающие синтез монофазы наноразмерных кристаллов β -волластонита $\beta\text{-CaSiO}_3$ (60–80 нм), ортосиликата стронция Sr_2SiO_4 (20–40 нм) и метасиликата бария (25–80 нм) [10–12].

Полученные результаты натолкнули нас на идею не останавливаться на достигнутом и продолжить исследования по применению нового подхода, основанного на использовании вышеприведенного гидросиликагеля для получения ортосиликата цинка.

Данная работа посвящена изучению влияния условий проведения синтеза в системе $\text{SiO}_2\text{--NaOH--ZnCl}_2\text{--H}_2\text{O}$, где в качестве SiO_2 использовался гидросиликагель, выделенный из серпентина, на формирование ортосиликата цинка при дальнейшей термообработке. Для достижения поставленной цели были применены дифференциально-термический (ДТА) и рентгенофазовый (РФА) методы анализов.

По разработанной методике из образца серпентинита, взятого с месторождения Шоржа (Армения), синтезировался образец гидросиликагеля, содержащий 5,7 % SiO_2 [13].

Для получения 1,6 М раствора гидроксида натрия в колбу помещали 7,76 г NaOH (влажность 10 %) и добавляли 23 мл дистиллированной воды, после чего добавляли 11,65 г гидросиликагеля, содержащего 5,7 % SiO_2 , и 3 г хлорида цинка ZnCl_2 . В результате получалась исходная смесь со стехиометрическим соотношением реагентов $\text{SiO}_2 : \text{Na}_2\text{O} : \text{ZnO}$, равным 1 : 2 : 2. Подготовленный образец раствора перемешивался при атмосферном давлении и комнатной температуре приводной мешалкой в течение 60 мин. Затем подготавливались еще два образца исходного раствора, которые нагревались до температуры кипения (95 °C). Далее кипящий раствор одного из образцов перемешивался в течение 15 мин, а другой в течение 30 мин. Пульпа, образующаяся после обработки каждого образца, отделялась от раствора фильтрованием через бумажный фильтр и промывалась дистиллированной водой для удаления Na^+ - и Cl^- -ионов. Полученный осадок выдерживался при температуре 80–100 °C в течение 24 ч в сушильном шкафу КВС G–100/250 производства фирмы Premed (Варшава, Польша). Затем высушенный образец подвергался РФА

на дифрактометре «ДРОН–3» (Россия) с использованием никелевого фильтра при скорости движения счетчика $2 \text{ град}\cdot\text{мин}^{-1}$ и ДТА на дериватографе Q–1500 D фирмы MOM (Венгрия) в среде атмосферы со скоростью нагрева $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$.

На основе результатов ДТА были определены температуры для дальнейшей термообработки осажденных интермедиантов, которая осуществлялась постепенным нагревом со скоростью $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до требуемых температур. Значения температур и режим обжига устанавливались и контролировались с помощью муфельной печи Wise Therm F digital (China).

Образцы, термообработанные и полученные после ДТА, также исследовались с помощью РФА. Все рефлексы отражения расшифрованы и идентифицированы с помощью компьютерной базы данных JCPDS–ICDD 2022 г.

Отсутствие дифракционных пиков на рентгенограммах осажденных промежуточных образцов, высушенных при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$, показывает, что независимо от условий проведения перемешивания осажденные соединения находятся в аморфном состоянии.

Кривые ДТА (DTA) всех промежуточных образцов демонстрируют один эндотермический эффект в области низких температур до $200 \text{ }^\circ\text{C}$, вызванный выделением связанной воды из осажденных интермедиантов, и один экзотермический эффект выше $600 \text{ }^\circ\text{C}$, сопровождаемый изменением хода кривой дифференциальной термогравиметрии (DTG) (рис. 1). Термогравиметрические кривые (TG) показывают, что, несмотря на то что значительная потеря массы имеет место до $300 \text{ }^\circ\text{C}$, выше этой температуры процесс выделения воды все еще продолжает медленно протекать (см. рис. 1).

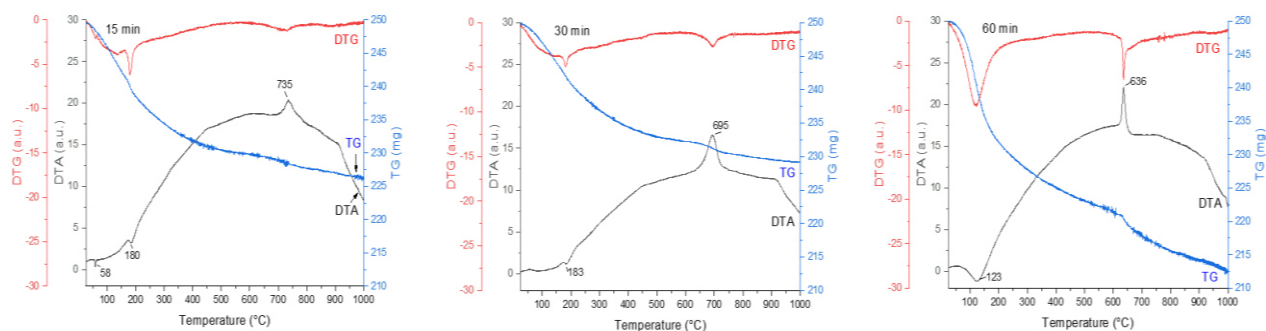


Рис. 1. Кривые TG, DTG и ДТА образцов-интермедиантов, осажденных перемешиванием водного раствора, приготовленного из ZnCl_2 , NaOH и SiO_2 , в течение 60 мин при комнатной температуре и в течение 15 и 30 мин кипящего раствора

Для выяснения природы экзотермических пиков были проанализированы дифрактограммы промежуточных образцов, полученных после термообработки и после ДТА ($1000 \text{ }^\circ\text{C}$) (рис. 2).

После нагрева до $625 \text{ }^\circ\text{C}$ образца-интермедианта, полученного перемешиванием при комнатной температуре, на рентгенограмме появляются рефлексы отражения, характерные для $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ (card ID 00-014-0653), но при этом прослеживаются едва заметные зачатки начала формирования дифракционных пиков, свойственных виллемиту (card ID 01-070-1235) (см. рис. 2, а). Дальнейший нагрев данного образца до 650 и $750 \text{ }^\circ\text{C}$ сопровождается увеличением интенсивности пиков $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ и появлением более ярко выраженных рефлексов виллемита. При $850 \text{ }^\circ\text{C}$ картина меняется: наблюдается доминирование фазы виллемита над $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$. РФА данного образца после ДТА уже демонстрирует только интенсивные пики виллемита и кристаллита SiO_2 (card ID 01-076-0941) (см. рис. 2, а).

При нагреве до $650 \text{ }^\circ\text{C}$ образца, полученного 15-минутным перемешиванием кипящего исходного раствора, на дифрактограмме регистрируются рефлексы отражения оксида цинка ZnO (card ID 00-003-0888) и едва заметные дифракционные пики $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ (см. рис. 2, б). Нагрев до $710 \text{ }^\circ\text{C}$ не приводит к существенным изменениям: фиксируется лишь повышение интенсивности пиков $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$. Интенсивные дифракционные пики виллемита со слабыми рефлексами отражения $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ вырисовываются для данного образца при $800 \text{ }^\circ\text{C}$. При дальнейшем нагреве до 900 и $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ фиксируется только монофаза виллемита (см. рис. 2, б).

Аналогичная картина наблюдается при термообработке образца, полученного 30-минутным перемешиванием кипящего исходного раствора.

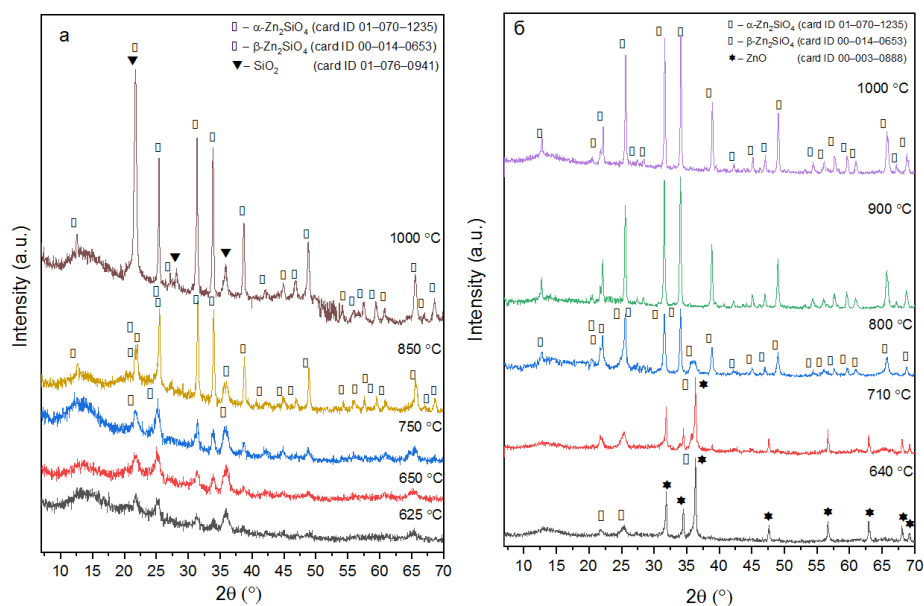


Рис. 2. Дифрактограммы термообработанных при определенных температурах образцов-интермедиантов, предварительно осажденных перемешиванием водного раствора, приготовленного из ZnCl_2 , NaOH и SiO_2 , в течение 60 мин при комнатной температур (а) и в течение 15 мин кипящего раствора (б)

Анализируя и сопоставляя полученные экспериментальные данные, можно заключить, что на кривых ДТА экзотермический эффект в области выше 600 °C вызван, скорее всего, процессом трансформации $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ модификации в виллемит (см. рис. 1). При этом 60-минутное перемешивание при комнатной температуре водного раствора, приготовленного из NaOH , ZnCl_2 и гидросиликагеля, полученного из серпентина, приводит к образованию интермедианта, который при нагреве после удаления воды начиная с температуры 625 °C постепенно кристаллизуется в $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ фазу, часть которой одновременно превращается $\alpha\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$, в результате чего на кривой ДТА появляется экзотермический эффект с максимумом при 636 °C (см. рис. 1). Несмотря на то что кристаллизация остальной части $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ протекает выше 800 °C (см. рис. 2, а), на кривой ДТА не обнаруживается каких-либо эффектов (см. рис. 1). Вероятнее всего, экзотермический процесс перехода β -фазы ортосиликата цинка в α -фазу подавляется все еще продолжающимся эндотермическим процессом дегидроксиляции, который в этом образце, по сравнению с интермедиантами, осажденными в кипящем растворе, протекает с выделением большего количества воды, о чем свидетельствуют результаты ТГ (см. рис. 1). При 1000 °C формируется конечный продукт, состоящий из двух фаз, — виллемита и кристобалита (рис. 2, а). Что касается образцов промежуточных соединений, осажденных в кипящем растворе, наличие рефлексов ZnO наряду с $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ фазой при их нагреве до 710 °C свидетельствует о неполном взаимодействии реагентов в процессе перемешивания (см. рис. 2, б). Тем не менее, обнаружение монофазы виллемита при термообработке выше 800 °C указывает на вовлечение непрореагировавших активных ZnO и SiO_2 в синтез и на завершение полного взаимодействия между реагентами при нагреве (см. рис. 2, б). Следовательно, экзотермический эффект этих образцов с максимумом при 765 и 695 °C соответственно также обусловлен двумя процессами: превращением $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ в $\alpha\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ модификацию и формированием виллемита из непрореагировавших ZnO и SiO_2 (см. рис. 1). Интересен тот факт, что при нагреве образца, полученного при комнатной температуре, в конечном продукте синтезируется кристобалит, что также указывает на неполное взаимодействие между компонентами в исходной системе, которое в этом интермедианте не инициируется дальнейшей термообработкой, однако на рентгенограммах термообработанных образцов не обнаруживается ZnO , соответствующий данному SiO_2 (см. рис. 2, а). Сформированные кристаллы виллемита уже наблюдаются для образцов, выдержанных до 900 °C.

Итак, благодаря применению в системе $\text{SiO}_2\text{--NaOH--ZnCl}_2\text{--H}_2\text{O}$ в качестве исходного реагента гидросиликагеля, выделенного из серпентинового минерала, удастся не только синтезировать ортосиликаты цинка, в частности виллемит, при низких температурах, но и значительно упростить процедуру его получения.

Эти исследования представляют большой практический интерес, поскольку создают предпосылки для дальнейшей разработки эффективной методики получения модификаций ортосиликата цинка и других материалов на их основе.

Список источников

1. Jaafar S. H., Zaid M. H. M., Matori K. A., Aziz S. H. A., Mohamed Kamari H., Honda S. et al. Influence of calcination temperature on crystal growth and optical characteristics of Eu^{3+} doped $\text{ZnO}/\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ composites fabricated via simple thermal treatment method // *Crystals*. 2021. Vol. 11 (2):115. URL: <https://doi.org/10.3390/cryst11020115>.
2. Ibrevia Ts., Dimitrov Ts., Titorenkova R., Markovska I., Tacheva E., Petrov O. Synthesis and characterization of willemite ceramic pigments in the system $x\text{CoO} \cdot (2-x) \text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$ // *Bulg Chem Commun*. 2018. Special Issue F. Vol. 50. P. 31–37.
3. Zaid M. H. M., Matori K. A., Ab Aziz S. H., Kamari H. M., Fen Y. W., Yaakob Y. et al. Effect of heat treatment temperature to the crystal growth and optical performance of Mn_3O_4 doped $\alpha\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ based glass-ceramics // *Results in Physics*. 2019. Vol. 15 (102569). URL: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102569>.
4. Bharti D. K., Verma K., Srivastava A. K., Gupta M. K. The effect of Co-doping on dielectric properties and bandgap of zinc silicate nanowires // *J Appl Phys*. 2020. Vol. 127 (8). P. 085104-1–085104-6.
5. Dai P., Sun Y.-Q., Bao Z.-W., Zhu J., Wu M.-Z. Optical and adsorption properties of mesoporous $\text{SiO}_2/\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{3+}$ hollow nanospheres // *Micro & Nano Letters*. 2017. Vol. 12 (4). P. 248–251.
6. Rivera-Enríquez C. E., Fernández-Osorio A., Chávez-Fernández J. Luminescence properties of α - and β - $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ nanoparticles prepared by a co-precipitation method // *J Alloys Compd*. 2016. Vol. 688. P. 775–782.
7. Samigullina R. F., Krasnenko T. I. Thermal analysis and mechanism of formation of $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ phosphor under heating of synthetic hemimorphite // *Mater Res Bull*. 2020. Vol. 129 (110890). URL: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.110890>.
8. Samigullina R. F., Ivanova I. V., Zaitseva N. A., Krasnenko T. I. Solid-state synthesis of the $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ phosphor: Sequence of phase formation, localization and charge state of Mn ions in the intermediate and final reaction products // *Optical Materials*. 2022. Vol. 132 (112788). URL: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112788>.
9. Auwalu I. A., Halimah M. K., Zaidan A. W., Chan K. T., Abdullahi U. Structural and thermal diffusivity of Sm^{3+} doped willemite glass ceramics system from waste materials // *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 268. P. 117–123.
10. Zulumyan N., Isahakyan A., Beglaryan H., Melikyan S. The Influence of NaOH on the synthesis of calcium silicates // *JIOPM*. 2017. Vol. 27 (5). P. 1323–1332.
11. Zulumyan N., Isahakyan A., Beglaryan H., Melikyan S., Terzyan A. The development of a new route to the synthesis of strontium orthosilicate // *J Therm Anal Calorim*. 2019. Vol. 137 (4). P. 1471–1481.
12. Beglaryan H. A., Melikyan S. A., Zulumyan N. H., Terzyan A. M., Isahakyan A. R. Influence of colloid synthesis techniques on barium silicates formation using silica hydrogel derived from serpentine minerals // *J Mol Liq*. 2019. Vol. 291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111263>.
13. Зулумян Н. О., Исаакян А. Р., Овсепян Т. А., Казанчян А. М., Терзян А. М. Способ комплексной обработки серпентинитов. Патент РФ 2407704 С2. 2010.
14. Исаакян А. Р., Бегларян А. А., Пирумян П. А., Папахчян Л. Р., Зулумян Н. О. ИК-спектроскопическое исследование аморфных диоксидов кремния // *Журнал физической химии*. 2010. Т. 84, № 12. С. 1–4.
15. Зулумян Н. О., Исаакян А. Р., Пирумян П. А., Бегларян А. А. Структурные особенности аморфных диоксидов кремния // *Журнал физической химии*. 2010. Т. 84, № 4. С. 791–793.

References

1. Jaafar S. H., Zaid M. H. M., Matori K. A., Aziz S. H. A., Mohamed Kamari H., Honda S. et al. Influence of calcination temperature on crystal growth and optical characteristics of Eu^{3+} doped $\text{ZnO}/\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ composites fabricated via simple thermal treatment method. *Crystals*, 2021, vol. 11, no. 2, 115. Available at: <https://doi.org/10.3390/cryst11020115>.
2. Ibrevia Ts., Dimitrov Ts., Titorenkova R., Markovska I., Tacheva E., Petrov O. Synthesis and characterization of willemite ceramic pigments in the system $x\text{CoO} \cdot (2-x) \text{ZnO} \cdot \text{SiO}_2$. *Bulg Chem Commun*, 2018, Special Issue F, vol. 50, pp. 31–37.
3. Zaid M. H. M., Matori K. A., Ab Aziz S. H., Kamari H. M., Fen Y. W., Yaakob Y. et al. Effect of heat treatment temperature to the crystal growth and optical performance of Mn_3O_4 doped $\alpha\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ based glass-ceramics. *Results in Physics*, 2019, vol. 15, 102569. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102569>.
4. Bharti D. K., Verma K., Srivastava A. K., Gupta M. K. The effect of Co-doping on dielectric properties and bandgap of zinc silicate nanowires. *J Appl Phys*, 2020, vol. 127, no. 8, pp. 085104-1–085104-6.
5. Dai P., Sun Y.-Q., Bao Z.-W., Zhu J., Wu M.-Z. Optical and adsorption properties of mesoporous $\text{SiO}_2/\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{3+}$ hollow nanospheres. *Micro & Nano Letters*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 248–251.
6. Rivera-Enríquez C. E., Fernández-Osorio A., Chávez-Fernández J. Luminescence properties of α - and β - $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ nanoparticles prepared by a co-precipitation method. *J Alloys Compd*, 2016, vol. 688, pp. 775–782.
7. Samigullina R. F., Krasnenko T. I. Thermal analysis and mechanism of formation of $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ phosphor under heating of synthetic hemimorphite. *Mater Res Bull*, 2020, vol. 129, 110890. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.110890>.
8. Samigullina R. F., Ivanova I. V., Zaitseva N. A., Krasnenko T. I. Solid-state synthesis of the $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ phosphor: Sequence of phase formation, localization and charge state of Mn ions in the intermediate and final reaction products. *Optical Materials*, 2022, vol. 132, 112788. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112788>.
9. Auwalu I. A., Halimah M. K., Zaidan A. W., Chan K. T., Abdullahi U. Structural and thermal diffusivity of Sm^{3+} doped willemite glass ceramics system from waste materials. *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 268, pp. 117–123.
10. Zulumyan N., Isahakyan A., Beglaryan H., Melikyan S. The Influence of NaOH on the synthesis of calcium silicates. *JIOPM*, 2017, vol. 27, no. 5, pp. 1323–1332.

11. Zulumyan N., Isahakyan A., Beglaryan H., Melikyan S., Terzyan A. The development of a new route to the synthesis of strontium orthosilicate. *J Therm Anal Calorim*, 2019, vol. 137, no. 4, pp.1471–1481.
12. Beglaryan H. A., Melikyan S. A., Zulumyan N. H., Terzyan A. M., Isahakyan A. R. Influence of colloid synthesis techniques on barium silicates formation using silica hydrogel derived from serpentine minerals. *J Mol Liq*, 2019, vol. 291. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111263>.
13. Zulumyan N. O., Isaakyan A. R., Ovsepyan T. A., Kazanchyan A. M., Terzyan A. M. Sposob kompleksnoy obrabotki serpentinitov [Sposob kompleksnoy obrabotki serpentinitov] (A complex method of serpentinites treatment). Patent RF 2407704 C2. 2010. (In Russ.).
14. Isahakyan A. R., Beglaryan H. A., Pirumyan P. A., Papakhchyan L. R., Zulumyan N. H. An IR spectroscopic study of amorphous silicas. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2011, vol. 85, no 1, pp. 72–75.
15. Zulumyan N. O., Isaakyan A. R., Pirumyan P. A., Beglaryan A. A. The structural characteristics of amorphous silicas. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2010, vol. 84, no. 4, pp. 700–702.

Информация об авторах

А. А. Бегларян — кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник;
А. Р. Исаакян — кандидат технических наук, ведущий специалист;
А. М. Терзян — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
Н. О. Зулумян — доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией.

Information about the authors

H. A. Beglaryan — PhD (Chemistry), Senior Lecturer, Senior Researcher;
A. R. Isahakyan — PhD (Engineering), Leading Specialist;
A. M. Terzyan — PhD (Engineering), Senior Researcher;
N. H. Zulumyan — Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Head of Laboratory.

Статья поступила в редакцию 28.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 28.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.