

Научная статья
УДК 666.112.7:666.124.2
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.008

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАТРИЕВОБОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ, ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

**Федор Константинович Ключев¹, Марина Юрьевна Конон²,
Марина Андреевна Гирсова³, Михаил Борисович Аликин⁴**

^{1–3}Филиал федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Санкт-Петербург, Россия

^{1, 4}Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Россия

¹vivi.veve.vivi@gmail.com

²marina-konon@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5443-9447>

³girsovama@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2909-3071>

⁴alikinmix@gmail.com

Аннотация

Приведены результаты исследования натриевоборосиликатных стекол, легированных оксидами переходных металлов (на примере Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , Ni_2O_3) методами оптической и ИК-спектроскопии. Установлены степени окисления и координации по кислороду, присущие ионам переходных металлов в исследованном стекле.

Ключевые слова:

боросиликатное стекло, оксиды переходных металлов, оптическая спектроскопия, ИК-спектроскопия, NiO , Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , магнетит, эсколаит

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Филиала НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ — ИХС на 2025–2027 гг. (номер государственной регистрации №1024030700034-2-1.4.3, Тематика 3).

Финансирование:

государственное задание по теме НИР №1024030700034-2-1.4.3, Тематика 3.

Для цитирования:

Ключев Ф. К., Конон М. Ю., Гирсова М. А., Аликин М. Б. Спектральные свойства натриевоборосиликатных стекол, легированных оксидами переходных металлов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 4. С. 50–55. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.008.

Original article

SPECTRAL PROPERTIES OF SODIUM BOROSILICATE GLASSES DOPED WITH TRANSITION METAL OXIDES

Fedor K. Klyushev¹, Marina Yu. Konon², Marina A. Girsova³, Mikhail B. Alikin⁴

^{1–3}Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute», Saint-Petersburg, Russia

^{1, 4}Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint-Petersburg, Russia

¹vivi.veve.vivi@gmail.com

²marina-konon@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5443-9447>

³girsovama@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2909-3071>

⁴alikinmix@gmail.com

Abstract

The results of the study of sodium borosilicate glasses doped with transition metal oxides (using Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , Ni_2O_3 as an example) using optical and IR spectroscopy are presented. The oxidation numbers and oxygen coordination inherent in the transition metal ions in the studied glass are established.

Keywords:

borosilicate glass, transition metal oxides, optical spectroscopy, IR spectroscopy, NiO , Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , magnetite, eskolaite

Acknowledgments:

the work was carried out within the framework of the state assignment of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre for 2025–2027 (state registration number No. 1024030700034-2-1.4.3, Subject 3).

Funding:

state assignment on the topic of research and development No. 1024030700034-2-1.4.3, Topic 3.

For citation:

Klyushev F. K., Konon M. Yu., Girsova M. A., Alikin M. B. Spectral properties of sodium borosilicate glasses doped with transition metal oxides // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 4. P. 50–55. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.4.008.

Введение

Боросиликатные стекла (БС) — это особый тип стекол, которые содержат два оксида стеклообразователя, т. е. SiO_2 и B_2O_3 , что позволяет сочетать преимущества стабильности и устойчивости к атмосферной влаге силикатного стекла и превосходной растворимости ионов переходных металлов (ИПМ) боратного стекла [1]. БС находят широкое применение в качестве элементов оптических устройств, защитных экранов от радиации, экранов дисплеев и фармацевтической тары [1]. Стекла, легированные ИПМ, в последнее время привлекают внимание исследователей из-за их фотопроводящих и специальных оптических свойств, которые проявляются потому, что ИПМ в стекле могут существовать в разных степенях окисления, что, в свою очередь, может определять различные структурные роли ИПМ в сетке стекла. Кроме того, ИПМ часто применяются в качестве красителей в стеклах. Их окрашивающая способность обусловлена переходами d -уровня этих катионов. Эти отличительные качества стекол, легированных ИПМ, определяют их применение в различных приложениях таких, как твердотельные лазеры, концентраторы солнечной энергии и системы оптоволоконной связи [2]. В связи с чем особенно актуальными представляются исследования спектральных свойств БС, легированных ИПМ.

Целью данной работы являлось исследование натриевоборосиликатных стекол (НБС), легированных оксидами переходных металлов, (на примере Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , Ni_2O_3) методами оптической и ИК-спектроскопии.

Материалы и методы

Объектами исследования в данной работе были стекла составов (мол. %, по синтезу) $6\text{Na}_2\text{O} \cdot 22\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 70\text{SiO}_2 \cdot 2\text{Me}_2\text{O}_3$, где $\text{Me} = \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Ni}$. Стекла были синтезированы методом варки из шихты в платиновых тиглях в силитовой печи при температуре 1420–1520 °С в течение 1,5–4 ч в зависимости от состава с постоянным перемешиванием платиновой мешалкой. В качестве сырьевых материалов для составления шихты использовали Na_2CO_3 (осч), H_3BO_3 (чда), SiO_2 в виде молотого кварцевого стекла — Cr_2O_3 (чда), Mn_2O_3 (чда), Fe_2O_3 (чда) и Ni_2O_3 (чда). После отливки стекла отжигались в муфельной печи для снятия внутренних напряжений. После отжига все стекла были дополнительно термообработаны при 550 °С в течение 96–144 ч для инициации процесса ликвации (фазового разделения). Стекла были исследованы методом оптической спектроскопии в диапазоне 190–1100 нм на высокочувствительном UV/VIS спектрофотометре СФ-2000 («ОКБ Спектр», Россия) с шагом съемки 1 нм. Измерения проводили при комнатной температуре на плоскопараллельных полированных образцах толщиной $1 \pm 0,02$ мм. Спектры инфракрасной ИК-спектроскопии пропускания образцов двухфазных стекол были получены на инфракрасном спектрометре с Фурье-преобразованием Shimadzu IRTracer-100 (Shimadzu, Япония). Образцы для измерения представляли собой прессованную из смеси образца и KBr-таблетку диаметром 10 мм, соотношение образца к KBr — 1:100. Спектры были сняты на 32 сканах в диапазоне от 4000 до 400 cm^{-1} с разрешением 2 cm^{-1} при температуре в помещении 20 °С.

Результаты исследований

На ИК-спектрах исследованных стекол наблюдаются следующие полосы пропускания (рис. 1). Для всех стекол обнаружены полосы, характерные для ассиметричных валентных (при 1097–1094 cm^{-1}) и деформационных (при 803–793 и 465 cm^{-1}) колебаний в кремний-кислородных группах [3]. Также на спектрах присутствуют полосы около 925–902 и 679–669 cm^{-1} , обусловленные ассиметричными валентными колебаниями связей В-О-Si [3, 4]. Для всех стекол наблюдаются полосы пропускания, которые можно отнести к деформационным колебаниям в тригональных BO_3 группах (1394, 702–696, 679–669 cm^{-1}) [3, 5], а также плечи при 1245–1233 cm^{-1} , которые можно приписать валентным колебаниям связей В-О в цепочках $[\text{BO}_2\text{O}]_n$ [6]. Спектры стекол, легированных оксидами хрома и марганца, несколько отличаются от остальных исследованных стекол. В частности, на спектре хромсодержащего стекла наблюдается полоса пропускания при 582 cm^{-1} , которая соответствует колебаниям связи О-Cr-O в Cr_2O_3 [3], а также полоса с минимумом при 624 cm^{-1} , которая является характерной

для симметричных валентных колебаний Si-O-Si в отдельных тетраэдрах SiO_4 полимеризованной структуры каркасных силикатов, таких как α -кристобалит [3]. Это подтверждается результатами рентгенофазового анализа (РФА), которые показали наличие фазы кристобалита для этого стекла [3]. Среди исследованных стекол хромосодержащее стекло является единственным составом, в котором кристаллизуется кристобалит. Для марганецсодержащего стекла наблюдается полоса при 760 см^{-1} , которую можно отнести к колебаниям связей Mn-O [7].

Исследования стекол методом оптической спектроскопии показали, что единственным стеклом, пропускающим видимый свет, является стекло, легированное оксидом марганца, оно обладает яркой бордово-красной окраской. Пропускание при 650 нм достигало 30 %. Также на спектре имелась одна полоса поглощения при 392 нм (на рисунках не приведено). Остальные стекла обладают высокой адсорбционной способностью по отношению к ультрафиолетовым и коротковолновым лучам видимого света. Все они интенсивно окрашены во всем объеме стекла. Введение оксида хрома придало стеклу изумрудно-зеленую окраску, железа — черную, а никеля — оливково-зеленую. Пропускание этих стекол в видимой области не превышает 3 %. В связи с этим представлены спектры оптической плотности исследованных стекол (рис. 2).

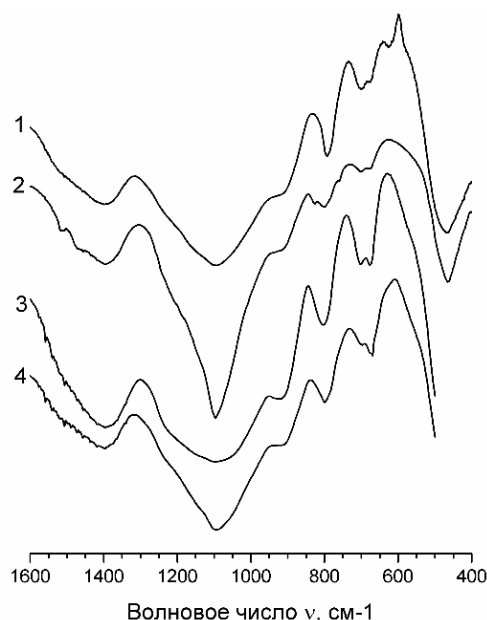


Рис. 1. ИК-спектры исследованных стекол, легированных: 1 — Cr_2O_3 ; 2 — Mn_2O_3 ; 3 — Fe_2O_3 ; 4 — Ni_2O_3

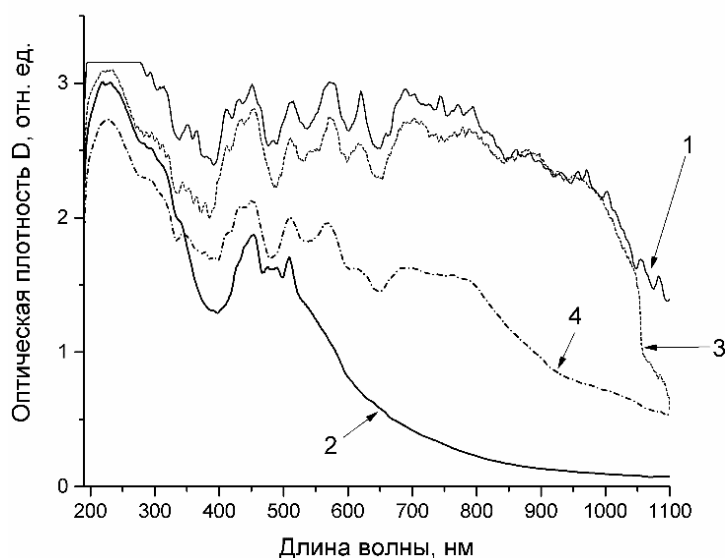


Рис. 2. Спектры оптической плотности исследованных стекол, легированных: 1 — Cr_2O_3 ; 2 — Mn_2O_3 ; 3 — Fe_2O_3 ; 4 — Ni_2O_3

Спектры оптической плотности имеют сложную форму со множеством полос поглощения (рис. 2). Наибольшее количество полос поглощения наблюдается на спектрах стекол, легированных оксидами хрома и железа. Для хромосодержащего стекла наиболее выраженными являются полосы поглощения при 410, 441, 451, 515, 575, 620 и 690 нм. Согласно литературным данным, большую часть из них можно отнести к различным переходам в ионах Cr^{3+} в октаэдрической координации [8, 9]. Согласно работе [10] полоса при 515 нм может соответствовать поглощению ионов Cr^{6+} в тетраэдрической координации. Полосы поглощения ионов Cr^{6+} также находятся в ультрафиолетовой области спектра (340–389 нм) [9–11]. Однако в нашем случае спектры поглощения в данном диапазоне достаточно зашумлены и не позволяют с уверенностью утверждать наличие в стекле ионов Cr^{6+} . Исследования методом ЭПР и РФЭС, проведенные ранее в работе [3], не подтвердили наличия в синтезированном стекле ионов хрома в степенях окисления, отличных от $3+$. В связи с чем можно предположить, что наличие полос поглощения, относящихся к электронным переходам ионов хрома в других степенях

окисления, не являются достаточным доказательством их присутствия в стеклах. Для железосодержащего стекла наиболее выраженными являются полосы поглощения при 410, 433, 454, 510, 572, 618, 700 нм. Полосы при 433 и 510 нм можно приписать к переходам ионов Fe^{2+} в октаэдрической координации [12]. Все остальные полосы соответствуют переходам ионов Fe^{3+} в октаэдрической координации [12]. На наличие ионов Fe^{3+} в тетраэдрической координации может указывать слабое плечо при 572 см^{-1} на ИК-спектре (рис. 1).

Для никельсодержащего стекла наблюдаются полосы при 411, 432, 451 и 511 нм, которые относятся к переходам ионов Ni^{2+} основном в октаэдрической координации. Также на спектре присутствуют полосы при 568 и 618 нм, которые можно отнести к переходу ${}^3F_4 \rightarrow {}^3P_4$ и спин-разрешенному переходу ${}^3T_4(F) \rightarrow {}^3T_4(P)$ в ионах никеля $2+$ в тетраэдрической координации соответственно [13, 14].

Спектр марганецсодержащего стекла содержит меньше всего полос поглощения — 453, 475–490 и 508 нм. Полосу при 508 нм можно приписать переходу ${}^5E_g \rightarrow {}^5T_{2g}$ в ионах Mn^{3+} [15]. Полоса около 485 нм может быть обусловлена переходом ${}^5E_g \rightarrow {}^5T_{2g}$ ионов Mn^{3+} в октаэдрической координации [16]. Полосу при 453 нм можно приписать к Mn^{2+} ионам в октаэдрической координации [17].

Выводы

Исследованы НБС, легированные оксидами переходных металлов в количестве 2 мол. %, (на примере Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 , Ni_2O_3) методами оптической и ИК-спектроскопии. Показано, что ионы хрома присутствуют в стекле в виде $3+$ ионов в октаэдрической координации. Ионы никеля в исследованном стекле имеют степень окисления $2+$ и находятся как в октаэдрической, так и в тетраэдрической координации. Ионы железа и марганца находятся в двух степенях окисления ($+2$, $+3$) и тетраэдрической и октаэдрической координации. Полученные результаты могут быть полезны для создания оптических материалов специального назначения.

Список источников

1. Raghuvanshi V., Rashmi I., Ingle A., Shashikala H. D., Nagaraja H. S. A comprehensive study uncovering physical, structural, and optical properties of Cu_2O and TiO_2 -reinforced borosilicate glasses as optical filters // *Opt. Mater.* 2024. Vol. 153. P. 115601. doi: 10.1016/j.optmat.2024.115601.
2. Al-Hazmi F., Mansour S. F., AlHammad M. S., Abdo M. A., Sadeq M. S. Impact of sunlight on the optical properties and ligand field parameters of nickel borosilicate glasses // *Ceram. Int.* 2021. Vol. 47. P. 8566–8572. doi:10.1016/j.ceramint.2020.11.224.
3. Konon M., Polyakova I. G., Mazur A. S., Saratovskii A. S., Danilovich D. P., Alikin M. Crystallization of Cristobalite in Sodium Borosilicate Glass in the Presence of Cr_2O_3 // *Materials*. 2023. Vol. 16, № 14. P. 5016. doi:10.3390/ma16145016.
4. Lakshmi P. V., Rao T. G. V. M., Neeraja K., Reddy D. V. K., Reddy M. R. Investigation of optical, structural properties of Eu^{3+} by Mn^{2+} in barium alumino borosilicate glasses // *J. Mol. Struct.* 2016. Vol. 1125. P. 136–143. doi:10.1016/j.molstruc.2016.06.064.
5. Konon M., Antropova T., Zolotov N., Simonenko T., Simonenko N., Brazovskaya E., Kreisberg V., Polyakova I. Chemical durability of the iron-containing sodium borosilicate glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 2022. Vol. 584. P. 121519. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2022.121519.
6. Kupracz P., Karczewski J., Przeźniak-Welenc M., Szreder N. A., Winiarski M. J., Klimczuk T., Barczyński R. J. Microstructure and electrical properties of manganese borosilicate glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 2015. Vol. 423–424. P. 68–75. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2015.05.014.
7. Ling F. T., Post J. E., Heaney P. J., Kubicki J. D., Santelli C. M. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis of triclinic and hexagonal birnessites // *Spectrochim. Acta A*. 2017. Vol. 178. P. 32–46. doi:10.1016/j.saa.2017.01.032.
8. Padlyak B. V., Ryba-Romanowski W., Lisiecki R., Adamiv V. T., Burak Y. V., Teslyuk I. M. Synthesis, EPR and optical spectroscopy of the Cr-doped tetraborate glasses // *Opt. Mater.* 2012. Vol. 34. P. 2112–2119. doi:10.1016/j.optmat.2012.06.014.
9. Hassan M. A. Effect of halides addition on the ligand field of chromium in alkali borate glasses // *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 574. P. 391–397. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.05.177.
10. Sampaio D. V., Pena R. B., Moulton B. J. A., Rezende M. V., Silva D. C., Silva R. S., Cunha T. R., Mastelaro V. R., Zanutto E. D., Pizani P. S. Chromium in lead metasilicate glass: Solubility, valence, and local environment via multiple spectroscopy // *Ceram. Int.* 2022. Vol. 48. P. 173–178. doi:10.1016/j.ceramint.2021.08.377.

11. Barbieri L., Leonelli C., Manfredini T., Pellacani G. C., Siligardi C., Tondello E., Bertoncello R. Solubility, reactivity and nucleation effect of Cr_2O_3 in the $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glassy system // *J. Mater. Sci.* 1994. Vol. 29. P. 6273–6280. doi:10.1007/BF00354571.
12. Pshenko O. A., Girsova M. A., Golovina G. F., Antropova T. V. Study of the iron-containing sodium borosilicate two-phase glasses and porous glasses by optical spectroscopy // *Glass Phys. Chem.* 2016. Vol. 42. P. 33–37. doi:10.1134/S1087659616010156.
13. Elbatal F. H. A., Khalil M. M. I., Nada N., Desouky S. A. Gamma rays interaction with ternary silicate glasses containing mixed $\text{CoO} + \text{NiO}$ // *Mater. Chem. Phys.* 2003. Vol. 82. P. 375–385. doi:10.1016/S0254-0584(03)00270-0.
14. Moustaffa F. A., El-Batal F. H., Fayad A. M., El-Kashef I. M. Absorption studies on some silicate and borate glasses containing NiO or Fe_2O_3 or mixed $\text{NiO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ // *Acta Phys. Pol. A.* 2010. Vol. 117. P. 471–477. doi:10.12693/APhysPolA.117.471.
15. Hamdy Y. M., ElBatal F. H., Ezz-Eldin F. M., ElBatal H. A. Gamma rays interactions with transition metal doped-soda lime phosphate glasses evaluated by collective optical, FTIR spectral measurements // *Silicon.* 2019. Vol. 11. P. 673–684. doi:10.1007/s12633-018-9949-2.
16. Kumar A. S., Rao M. V. S., Ram G. C., Rao D. K. Microstructure and spectroscopic investigations of calcium zinc bismuth phosphate glass ceramics doped with manganese ions // *Indian J. Phys.* 2018. Vol. 92. P. 97–109. doi:10.1007/s12648-017-1069-0.
17. Wan M. H., Wong P. S., Hussin R., Lintang H. O., Endud S. Physical and Optical Properties of Calcium Zinc Borophosphate Glasses Doped with Manganese Ions // *Spectrosc. Lett.* 2015. Vol. 48. P. 473–480. doi:10.1080/00387010.2014.892512.

References

1. Raghuvanshi V., Rashmi I., Ingle A., Shashikala H.D., Nagaraja H.S. A comprehensive study uncovering physical, structural, and optical properties of Cu_2O and TiO_2 -reinforced borosilicate glasses as optical filters. *Optical Materials (Amsterdam)*, 2024, Vol. 153, 115601.
2. Al-Hazmi F., Mansour S. F., AlHammad M. S., Abdo M. A., Sadeq M. S. Impact of sunlight on the optical properties and ligand field parameters of nickel borosilicate glasses. *Ceramics International*, 2021, Vol. 47, pp. 8566–8572.
3. Konon M., Polyakova I. G., Mazur A. S., Saratovskii A. S., Danilovich D. P., Alikin M. Crystallization of Cristobalite in Sodium Borosilicate Glass in the Presence of Cr_2O_3 . *Materials (Basel)*, 2023, Vol. 16, No. 14, 5016.
4. Lakshmi P. V., Rao T. G. V. M., Neeraja K., Reddy D. V. K., Reddy M. R. Investigation of optical, structural properties of Eu^{3+} by Mn^{2+} in barium alumino borosilicate glasses. *Journal of Molecular Structure*, 2016, Vol. 1125, pp. 136–143.
5. Konon M., Antropova T., Zolotov N., Simonenko T., Simonenko N., Brazovskaya E., Kreisberg V., Polyakova I. Chemical durability of the iron-containing sodium borosilicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2022, Vol. 584, 121519.
6. Kupracz P., Karczewski J., Przëniak-Welenc M., Szreder N. A., Winiarski M. J., Klimczuk T., Barczyński R. J. Microstructure and electrical properties of manganese borosilicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015, Vol. 423–424, pp. 68–75.
7. Ling F. T., Post J. E., Heaney P. J., Kubicki J. D., Santelli C. M. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis of triclinic and hexagonal birnessites. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, Vol. 178, pp. 32–46.
8. Padyak B. V., Ryba-Romanowski W., Lisiecki R., Adamiv V. T., Burak Y. V., Teslyuk I. M. Synthesis, EPR and optical spectroscopy of the Cr-doped tetraborate glasses. *Optical Materials (Amsterdam)*, 2012, Vol. 34, pp. 2112–2119.
9. Hassan M.A. Effect of halides addition on the ligand field of chromium in alkali borate glasses. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, Vol. 574, pp. 391–397.
10. Sampaio D. V., Pena R. B., Moulton B. J. A., Rezende M. V., Silva D. C., Silva R. S., Cunha T. R., Mastelaro V. R., Zanotto E. D., Pizani P. S. Chromium in lead metasilicate glass: Solubility, valence, and local environment via multiple spectroscopy. *Ceramics International*, 2022, Vol. 48, pp. 173–178.
11. Barbieri L., Leonelli C., Manfredini T., Pellacani G.C., Siligardi C., Tondello E., Bertoncello R. Solubility, reactivity and nucleation effect of Cr_2O_3 in the $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glassy system. *Journal of Materials Science*, 1994, Vol. 29, pp. 6273–6280.
12. Pshenko O. A., Girsova M. A., Golovina G. F., Antropova T. V. Study of the iron-containing sodium borosilicate two-phase glasses and porous glasses by optical spectroscopy. *Glass Physics and Chemistry*, 2016, Vol. 42, pp. 33–37.

13. Elbatal F.H.A., Khalil M.M.I., Nada N., Desouky S.A. Gamma rays interaction with ternary silicate glasses containing mixed CoO + NiO. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, Vol. 82.
14. Moustaffa F.A., El-Batal F.H., Fayadd A.M., El-Kashef I.M. Absorption studies on some silicate and cabal glasses containing NiO or Fe₂O₃ or Mixed NiO + Fe₂O₃. *Acta Physica Polonica A*, 2010, Vol. 117, pp. 471–477.
15. Hamdy Y.M., ElBatal F.H., Ezz-Eldin F.M., ElBatal H.A. Gamma Rays Interactions with Transition Metal Doped-Soda lime Phosphate Glasses Evaluated by Collective Optical, *FTIR Spectral Measurements. Silicon*, 2019, Vol. 11, pp. 673–684.
16. Suneel Kumar A., Sambasiva Rao M.V., Chinna Ram G., Krishna Rao D. Microstructure and spectroscopic investigations of calcium zinc bismuth phosphate glass ceramics doped with manganese ions. *Indian Journal of Physics*, 2018, Vol. 92, pp. 97–109.
17. Wan M. H., Wong P. S., Hussin R., Lintang H. O., Endud S. Physical and Optical Properties of Calcium Zinc Borophosphate Glasses Doped with Manganese Ions. *Spectroscopy Letters: An International Journal for Rapid Communication*, 2015, Vol. 48, pp. 473–480.

Информация об авторах

Ф. К. Ключев — магистрант;

М. Ю. Конон — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник;

М. А. Гирсова — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник;

М. Б. Аликин — кандидат технических наук, научный сотрудник.

Information about the authors

F. K. Klyushev — Master Student;

M. Yu. Konon — PhD (Chemistry), Leading researcher;

M. A. Girsova — PhD (Chemistry), Leading researcher;

M. B. Alikin — PhD (Chemical technology), Researcher.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 27.08.2025.
The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 27.08.2025.