

Научная статья
УДК 666.266.6.01
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.005

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СТЕКОЛ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ P_2O_5 и MeO/MeF_2

Мхитар Рафаелович Оганесян¹, Джулия Рафаеловна Еганян², Николай Владиславович Яценко³, Татевик Васаконна Григорян⁴, Ваган Петросович Тороян⁵, Елена Викторовна Кумкумаджян⁶, Карине Карленовна Галоян⁷, Лусине Альбертовна Гаспарян⁸, Гоарик Габриеловна Манукян⁹, Николай Бабкенович Князян¹⁰

^{1–10}Институт общей и неорганической химии имени М. Г. Манвеляна Национальной академии наук Армении, Ереван, Армения

¹*h-mkhitar@mail.ru*

²*julia.yeganyan@gmail.com*

³*lashchenkonikolai@gmail.com*, <https://orcid.org/0009-0003-0951-9167>

⁴*tatev1984@mail.ru*

⁵*toroyan50@mail.ru*

⁶*yelena.kumkumajyan53@gmail.com*

⁷*kkgaloyan1954@mail.ru*

⁸*lagasparyan@list.ru*

⁹*gmanukyan@sci.am*, <https://orcid.org/0000-0001-8993-0471>

¹⁰*knigo51@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-9500-0588>

Аннотация

Исследованы области стеклообразования двухкомпонентных и трехкомпонентных систем на основе оксидов P_2O_5 , Al_2O_3 , оксидов и фторидов двухвалентных металлов (MgO , MgF_2 , CaO , CaF_2) с различными ионными радиусами и силовыми полями. На основании проведенных исследований были разработаны прочные стекла на основе оксифторалюмофосфата с высокими показателями микротвердости (480–540 кг/мм²), перспективные в качестве костных имплантатов.

Ключевые слова:

прозрачные ситаллы, стеклообразование, фазовое разделение, ликвация, микротвердость, термическое расширение, эвтектические составы

Для цитирования:

Синтез и исследование биологически активных стекол на основе систем, содержащих P_2O_5 и MeO/MeF_2 / М. Р. Оганесян [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 31–37. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.005.

Original article

SYNTHESIS AND STUDY OF BIOLOGICALLY ACTIVE GLASSES BASED ON SYSTEMS CONTAINING P_2O_5 AND MeO/MeF_2

Mkhitar R. Hovhannisyan¹, Julia R. Yeganyan², Nikolay V. Iashchenko³, Tatevik V. Grigoryan⁴, Vahan P. Toroyan⁵, Yelena V. Kumkumajyan⁶, Karine K. Galoyan⁷, Lusine A. Gasparyan⁸, Goharik G. Manukyan⁹, Nikolay B. Knyazyan¹⁰

^{1–10}M. G. Manvelyan Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia

¹*h-mkhitar@mail.ru*

²*julia.yeganyan@gmail.com*

³*lashchenkonikolai@gmail.com*, <https://orcid.org/0009-0003-0951-9167>

⁴*tatev1984@mail.ru*

⁵*toroyan50@mail.ru*

⁶*yelena.kumkumajyan53@gmail.com*

⁷*kkgaloyan1954@mail.ru*

⁸*lagasparyan@list.ru*

⁹*gmanukyan@sci.am*, <https://orcid.org/0000-0001-8993-0471>

¹⁰*knigo51@mail.ru*, <https://orcid.org/0000-0001-9500-0588>

Abstract

The glass formation regions of two-component and three-component systems based on P_2O_5 , Al_2O_3 oxides, and divalent metal oxides and fluorides (MgO , MgF_2 , CaO , CaF_2) with different ionic radii and force fields were investigated. Based on the conducted research, durable glasses based on oxyfluoroaluminophosphate with high microhardness (480–540 kg/mm²) were developed, which are promising as bone implants.

Keywords:

transparent glass ceramics, glass formation, phase separation, liquation, microhardness, thermal expansion, eutectic compositions

For citation:

Synthesis and study of biologically active glasses based on systems containing P_2O_5 and MeF_2 / M. R. Hovhannisyan [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 31–37. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.005.

Введение

С развитием медицины развиваются технологии получения новых биологически активных материалов, применяемых в качестве имплантатов для замещения и лечения больных или поврежденных частей тела. В настоящее время современную медицину практически невозможно представить без использования искусственных имплантатов в качестве биоматериалов — заменителей костной ткани. В связи с омоложением заболеваний костей и старением людей, увеличиваются и объемы биологических материалов, необходимых для лечения. Спрос на них растет, и среди них — биостекла с новыми свойствами, используемые для восстановления костной ткани и зубов, а также в качестве имплантатов. Поэтому получение биоматериалов с новым составом и улучшенными свойствами является чрезвычайно актуальной задачей. Перспективными в этом плане являются стекла бесщелочных алюмофосфатных систем с широким пределом изменения температуры стеклования и физико-химических свойств. Применение оксифторидов двухвалентных металлов с небольшим количеством фтора дает возможность регулирования составов и свойств стекол и повышения их технологичности [1–7].

Целью работы является исследование процессов стеклообразования в новых фторсодержащих фосфатных системах, синтез относительно легкоплавких стекол и стеклокристаллов на основе P_2O_5 - Al_2O_3 -0,8MeO/0,2MeF₂ (Me = Mg, Ca) с необходимыми свойствами.

Результаты

Исследованы области стеклообразования двухкомпонентных и трехкомпонентных систем на основе оксидов P_2O_5 , Al_2O_3 , оксидов и фторидов двухвалентных металлов (MgO , MgF_2 , CaO , CaF_2) с различными ионными радиусами и силовыми полями. Стекла синтезировали в открытых корундовых тиглях при 1 100–1 450 °С из предварительно спеченных шихт на основе P_2O_5 , Al_2O_3 и оксифторидов магния и кальция (с целью уменьшения потерь фтора) в течение 1 ч. Расплав отливали на холодную плиту и стальные формы, нагретые до температур стеклования образцов. Вследствие высокой летучести P_2O_5 стеклообразование систем изучалось при содержании $P_2O_5 \leq 80$ мол. %. Диаграммы плавкости, кристаллизация стекол двух- и трехкомпонентных систем в области стеклообразования исследованы методами ДТА, ДСК и РФА анализов.

На рисунке 1 представлены области стеклообразования псевдотройных систем P_2O_5 - Al_2O_3 -0,8MgO/0,2MgF₂ и P_2O_5 - Al_2O_3 -0,8CaO/0,2CaF₂, образующиеся соединения и поля кристаллизации. Из рис. 1 видно, что стекла, устойчивые к кристаллизации, образуют те составы многокомпонентных систем, которые расположены в низкотемпературной области диаграммы состояния системы. Бинарные фосфатные системы характеризуются легкоплавкостью, низкой температурой ликвидуса и образуют относительно широкие интервалы стеклообразования. Стеклообразования в псевдотройных системах непрерывны и граничат с обеими бинарными системами, ограниченными кристаллизацией расплавов. Бинарные системы P_2O_5 -0,8MgO/0,2MgF₂ и P_2O_5 -0,8CaO/0,2CaF₂ отличаются широкими областями стеклообразования, которое прекращается из-за резкого повышения температуры ликвидуса систем.

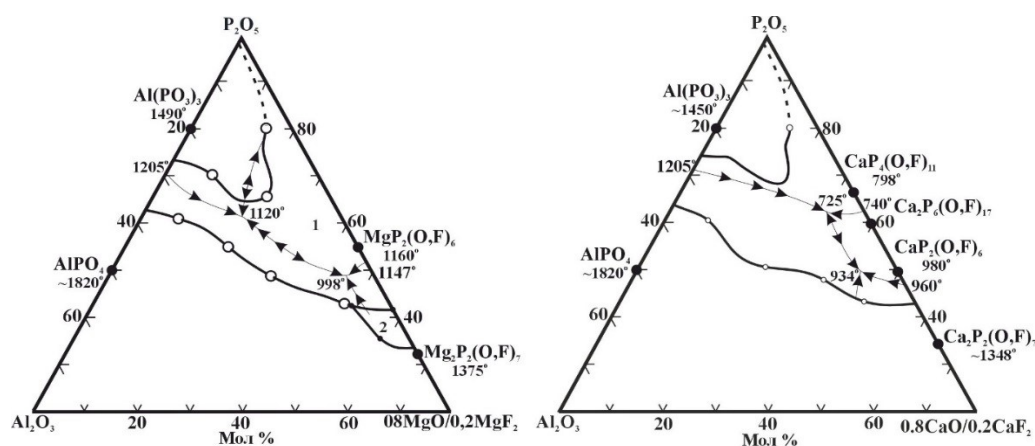


Рис. 1. Диаграммы области стеклообразования и плавкости систем $P_2O_5-Al_2O_3-0,8MgO/0,2MgF_2$ и $P_2O_5-Al_2O_3-0,8CaO/0,2CaF_2$:
1 — прозрачные стекла; 2 — глушеные стекла

Оксид фосфора P_2O_5 , являющийся основным стеклообразующим оксидом в системах, характеризуется низкой температурой плавления $600^\circ C$, что способствует расширению областей прозрачных стекол. В системе $P_2O_5-0,8MgO/0,2MgF_2$ в области образования стекол расположены поля первичной кристаллизации соединений $MgP_2(O, F)_6$ и $Mg_2P_2(O, F)_7$, плавящиеся конгруэнтно при 1160 и $1375^\circ C$ соответственно. В области нижней границы стеклования образуются глушеные стекла, что, вероятно, связано с выделением нанокристаллических частиц при охлаждении высокотемпературного расплава. Соединение $Mg_2P_2(O, F)_7$ расположено за пределом границы стеклования, что объясняется резким увеличением температуры ликвидуса системы и повышением склонности расплава к кристаллизации.

В области стеклообразования в бинарной фторсодержащей системе выявлена эвтектика при 44 мол. % $0,8MgO/0,2MgF_2$ ($\sim 1147^\circ C$), далее происходит резкий подъем температуры до плавления пиррофосфата магния.

В тройной $P_2O_5-Al_2O_3-0,8MgO/0,2MgF_2$ системе образуются две тройные эвтектики: в низкотемпературной области системы с температурой плавления $995^\circ C$ и в высокотемпературной области (содержание $Al_2O_3 \sim 20$ мол. %) $1122^\circ C$. В исследованной области системы образование тройных соединений не выявлено. В высокоалюминатной части системы наблюдается расширение области стеклообразования по сравнению с оксидной системой. В системе $P_2O_5-0,8CaO/0,2CaF_2$ стеклообразование заканчивается в поле кристаллизации соединения $Ca_2P_2(O, F)_7$ и глушеных стекол на границе стеклообразования не образуются. В области образования стекол расположены поля кристаллизации соединений $CaP_4(O, F)_{11}$ и $CaP_2(O, F)_6$, плавящихся конгруэнтно при 798 и $980^\circ C$, а также инконгруэнтно плавящегося при $780^\circ C$ соединения $Ca_2P_6(O, F)_{17}$. В системе $P_2O_5-Al_2O_3-0,8MgO/0,2MgF_2$ образуются две тройные эвтектики, расположенные в низкотемпературной области системы с температурами плавления 725 и $934^\circ C$. В обеих системах устойчивые к кристаллизации стёкла образуются при постоянном содержании $P_2O_5 = 50$ мол. %.

Согласно [8–10], в бинарной системе $P_2O_5-Al_2O_3$ образуются два соединения — $Al(PO_3)_3$ и $AlPO_4$, которые отличаются высокими температурами плавления (1490 и $1820^\circ C$) и узкой областью стеклообразования (от 61 до 74 мол. % P_2O_5), несмотря на существование в указанной области эвтектического состава с относительно низкой температурой плавления. Следовательно, без введения в бинарную систему $P_2O_5-Al_2O_3$ легкоплавких компонентов получение стекол прикладного значения технологически сложно осуществимо. При сравнении областей стеклообразования двух систем можно отметить расширение границ стеклообразования кальцийсодержащей системы в области высокого содержания Al_2O_3 . Следовательно, влияние двухвалентных элементов с различными ионными радиусами ($Ca^{+2} — 1,04 \text{ \AA}$; $Mg^{+2} — 0,74 \text{ \AA}$) на стеклообразование разное: чем больше ионный радиус катиона модификатора и ниже напряженность поля, тем больше снижается температура ликвидуса

и шире область стеклообразования системы. При расширении стеклообразования большое значение имеет также влияние оксифторидов кальция на высокотемпературную вязкость расплавов, которая уменьшается с возрастанием радиуса катиона. Способ представления составов кристаллических соединений на диаграммах систем обоснован тем, что при высокотемпературном плавлении или твердофазном синтезе часть вводимого фтора улетучивается и образуются соединения со смешанными анионами. Смешанные анионы $(O, F)_n$ показывают, что в соединениях определенные позиции могут занимать ионы кислорода или фтора [11]. Выявлено, что образование таких смешанных анионов в фосфор- и алюминийсодержащих стеклах предпочтительнее образуются в случае более слабых льюисовских кислот — ионов щелочноземельных металлов и при высоких концентрациях фтора [12; 13]. Наиболее перспективными для получения устойчивых к кристаллизации стекол являются стекла, составы которых близки к эвтектическим составам, присутствующим на диаграммах состояния псевдотройных систем, и легкоплавкие устойчивые стекла могут быть синтезированы даже при высоких концентрациях фтора [14; 15].

В конденсированных системах значения плотности и молярного объема веществ зависят от концентрации составляющих их частей и в пределах одной системы являются преимущественно аддитивными величинами, зависящими от числа компонентов. Плотность стекол может быть измерена с большой точностью, поэтому изменение плотности и молярного объема вещества в зависимости от состава, а также характер изменения компонентов позволяют судить о структурных изменениях, происходящих в стекле [15].

На рисунке 2 представлены зависимости плотности и молярного объема бинарных систем $P_2O_5-0,8MgO/0,2MgF_2$ и $P_2O_5-0,8CaO/0,2CaF_2$ от состава. Обе оксифторидные системы характеризуются тем, что замена P_2O_5 эквимольными количествами $0,8MgO/0,2MgF_2$ и $0,8CaO/0,2CaF_2$ приводит к монотонному росту значений плотности стекол во всем интервале стеклования: от 2,463 до 2,581 г/см³ для системы $P_2O_5-0,8MgO/0,2 MgF_2$ и от 2,492 до 2,617 г/см³ для системы $P_2O_5-0,8CaO/0,2 CaF_2$. Разница молярных масс P_2O_5 (142,0 г/моль) и оксифторидов: $0,8MgO/0,2 MgF_2$ (39,56 г/моль), $0,8CaO/0,2 CaF_2$ (60,5 г/моль) велика, следовательно, увеличение плотности стекол объясняется структурными изменениями в пространственной сетке стекол, связанными с деполимеризацией метафосфатных цепей с образованием пирофосфатных и монофторфосфатных групп и их плотной упаковки. Монотонное уменьшение молярного объема стекол обусловлено оптимальным распределением структурных групп $[P_2(O, F)_7]^{4-}$ и $[Me(O, F)_4]^{2-}$ в пространственной сетке стекол. Не исключено, что в пространственной сетке стекол могут образовываться и кольца $[P_4(O, F)_{12}]^{4-}$. Влияние оксифторидов на плотность стекол представляет особый интерес, так как во всем интервале введения наблюдается монотонное увеличение плотности. Известно, что оптимальное распределение катионов в полостях пространственной решетки стекла приводит к увеличению плотности стекол, причем чем больше ионный радиус и масса катиона, тем значительнее изменения молярного объема и плотности.

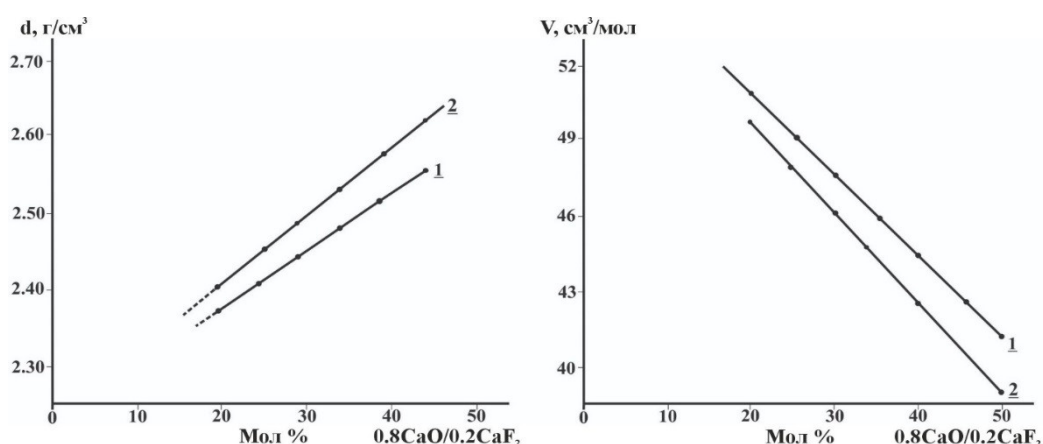


Рис. 2. Зависимость плотности (d) и молярного объема (V) стекол бинарной системы от состава:
1 — $P_2O_5-0,8 MgO/0,2 MgF_2$; 2 — $P_2O_5-0,8 CaO/0,2 CaF_2$

Как видно из приведенных зависимостей, кальциевые стёкла отличаются высокой плотностью и малым молярным объемом. Указанные структурные изменения также резко увеличивают значения микротвердости стекол: в изученной области систем $P_2O_5-Al_2O_3-0,8MeO/0,2MeF_2$ с постоянным содержанием $P_2O_5 = 60$ мол. % значения микротвердости стёкол варьируют в диапазоне 480–540 кг/мм², что является высоким показателем для фторфосфатных стекол [16]. При этом можно констатировать, что в интервале концентраций как оксифторидов кальция, так и магния (до 50 мол. %) увеличение плотности стекол в кальциевой системе составило 0,221–0,224 г/см³, а в случае магниевой существенно меньше и составляет ~0,150 г/см³.

Таким образом, для исследованных систем можно утверждать, что особенности изменения плотности и молярного объема стекол при введении оксифторидов определяются не только числом компонентов и их молярной массой, но и существенными структурными изменениями.

На рисунке 3 представлена зависимость значений ТКЛР стекол исследуемых систем от состава. Стекла характеризуются широким диапазоном изменения ТКЛР и температуры стеклования ($\alpha = 50-122 \cdot 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_g = 330-720 \text{ } ^\circ\text{C}$). Из кривых видно, что влияние оксифторидов обоих эвтектических составов в бинарных системах аналогично, и в целом значения ТКЛР стекол псевдобинарных систем монотонно уменьшаются с ростом концентрации оксифторидов. При больших количествах вводимых компонентов несимбатный ход изменения кривых, по-видимому, обусловлен неоднозначным вкладом катионов-модификаторов (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+}) в построении структурной сетки стекла. Оксифторидные группы ($[Me(O,F)_4]^{2-}$, $[Al(O,F)_4]^-$) совместно с фосфатными группами ($[P_4(O,F)_7]^{4-}$, $[P_2(O,F)_7]^{4-}$ и др.) могут образовать более плотную упаковку и прочные связи в пространственной решетке стекла и, следовательно, внести существенный вклад в значения термического расширения стекол. Чем сильнее связаны структурные группы стекла, тем ниже их подвижность и перемещение при термическом воздействии [17]. Монотонное изменение ТКЛР при введении оксифторидов и изменение этой зависимости от состава дают основание утверждать, что катионы Mg^{2+} , Ca^{2+} и Al^{3+} выполняют структурообразующую роль, что объясняет сравнительно широкие пределы значения коэффициента расширения стекол ($50 - 95 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), и высокими температурами стеклования ($680-720 \text{ } ^\circ\text{C}$) отличаются высокоалюминатные стекла.

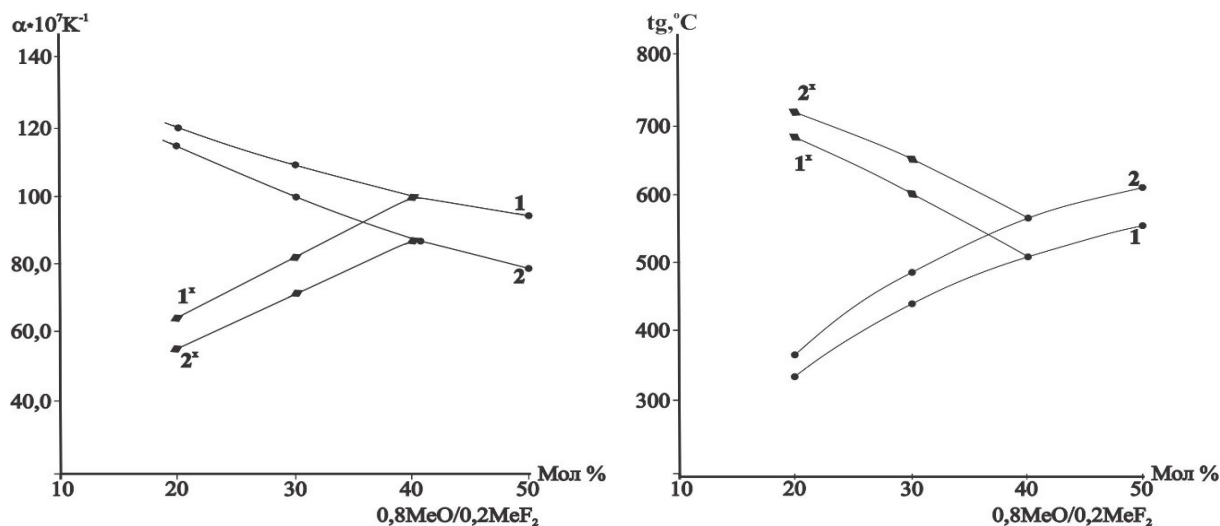


Рис. 3. Зависимость температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) стекол от состава:
1 — $P_2O_5-0,8 CaO/0,2 CaF_2$; 2 — $P_2O_5-0,8MgO/0,2 MgF_2$; 1', 2' — $P_2O_5-Al_2O_3-0,8MeO/0,2MeF_2$ ($P_2O_5 = 60$ мол. %)

Выводы

На основании проведенных исследований были разработаны прочные стекла на основе магнией- и кальцийсодержащих оксифторалюмофосфатных систем с высокими показателями микротвердости (480–540 кг/мм²), перспективные в качестве костных имплантатов.

Список источников

1. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. The role of P_2O_5 , TiO_2 and ZrO_2 as nucleating agents on microstructure and crystallization behavior of lithium disilicate-based glass // *Journal of materials science*. 2013. V. 48. P. 765–773.
2. Bhadeshia H. K. Thermal analyses techniques. Differential thermal analysis // *J. Material Science and Metallurgy*. 2002. P. 170–172.
3. Jones J. R., Brauer D. S., Hupa L., Greenspan D. C. Bioglass and Bioactive Glasses and Their Impact on Healthcare // *Journal of Applied Glass Science*. 2016. V. 7. P. 423–434.
4. Шульц М. М., Мазурин О. В. Современное представление о строении стекол и их свойства. Л.: Наука, 1988. 198 с.
5. Мазурин О. В., Стрельцина М. В., Швайко-Швайковская Т. П. Свойство стекол и стеклообразующих расплавов: Справочник. Л.: Наука, 1980. Т. 4, ч. 1. 443 с.
6. Князян Н. Б. Неорганические оксифторидные стекла // *Хим. ж. Армении*. 2017. Т. 70, № 3–4. С. 40–67.
7. Surmenev R. A., Surmeneva M. A., Ivanova A. A. Significance of calcium phosphate coatings for the enhancement of new bone osteogenesis — A review // *Acta Biomaterialia*. 2014. V. 10. P. 557–559.
8. Ван Везер. Фосфор и его соединения. М.: Иностранная литература, 1962. 687с.
9. Нараи-Сабо. Неорганическая кристаллохимия. Будапешт: АН Венгрии, 1969. 504 с.
10. Biscoe J., Pincus A. G., Smith C. S., Jr. Warren B. E. X-ray study of lime-phosphate and lime-borate // *J. Amer. Cer.* 1941. V. 24, № 4. P. 116–119.
11. Rabiee S. M., Nazparvar N., Azizian M., Vashae D., Tayebi L. Effect of ion substitution on properties of bioactive glasses: a review // *Ceramics International*. 2015. V. 41, № 6. P. 7241–7251.
12. Князян Н. Б. Влияние предкристаллизационного фазового разделения алюмосиликатных стекол на свойства прозрачной стеклокерамики // *Химия и материаловедение: Труды Кольского научного центра*. 2018. № 9, ч. 1. С. 48–53.
13. Вересов А. Г., Путляев В. И. Химия неорганических биоматериалов на основе фосфатов кальция // *Рос. хим. журн.* 2004. Т. 63. С. 52–64.
14. Гусева Е. В., Та А. Т., Буй С. В., Фесик Е. В. Биоактивные стеклообразные системы вида SiO_2 - CaO - P_2O_5 , допированные соединениями цинка(II) и марганца(II): эффективный синтез и свойства // *Химическая безопасность*. 2023. 7. (1). С. 38.
15. Портнова Н. Л., Завертяева Т. И., Соклаков А. И. // *Химия и технология конденсированных фосфатов*. Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1970. С. 64–68.
16. Оганесян М. Р., Князян Н. Б. Синтез стеклокристаллических материалов в системе CaO - MgO - SiO_2 - Al_2O_3 - SiO_2 с высокими значениями микротвердости // *Вестник НПУА. Химические и природоохранные технологии*. 2019. № 1. С. 42–49.
17. Оганесян М. Р., Оганесян Р. М., Князян Н. Б. Разработка стоматологического материала на основе фосфорсодержащей алюмосиликатной системы // *Вестник НПУ Армении. Серия: Химические и природоохранные технологии*. 2017. № 2. С. 9–17.

References

1. Fernandes H. R., Tulyaganov D. U., Ferreira J. M. F. The role of P_2O_5 , TiO_2 and ZrO_2 as nucleating agents on microstructure and crystallization behavior of lithium disilicate-based glass. *Journal of materials science*, 2013, vol. 48, pp. 765–773.
2. Bhadeshia H. K. Thermal analyses techniques. Differential thermal analysis. *J. Material Science and Metallurgy*, 2002, pp. 170–172.
3. Jones J. R., Brauer D. S., Hupa L., Greenspan D. C. Bioglass and Bioactive Glasses and Their Impact on Healthcare. *Journal of Applied Glass Science*, 2016, vol. 7, pp. 423–434.
4. Shul'ts M. M., Mazurin O. V. *Sovremennoe predstavlenie o stroenii stekol i ikh svoystva* [Modern Understanding of the Structure and Properties of Glasses]. Leningrad, Nauka, 1988, 198 p. (In Russ.).
5. Mazurin O. V., Strel'tsina M. V., Shvaiko-Shvaikovskaya T. P. *Svoystva stekol i stekloobrazuyushchikh rasplavov* [Properties of Glasses and Glass-Forming Melts]. Leningrad, Nauka, 1980., vol. 4, part 1, 443 p. (In Russ.).
6. Knyazyan N. B. Neorganicheskie oksifloridnye stekla [Inorganic Oxyfluoride Glasses]. *Khimicheskii zhurnal Armenii*, 2017, vol. 70, pp. 40–67. (In Russ.).
7. Surmenev R. A., Surmeneva M. A., Ivanova A. A. Significance of calcium phosphate coatings for the enhancement of new bone osteogenesis — A review. *Acta Biomaterialia*, 2014, vol. 10, pp. 557–559.
8. Van Vezér. *Fosfor i ego soedineniya* [Phosphorus and Its Compounds]. Moscow, Inostrannaya literatura, 1962, 687 p. (In Russ.).

9. Narai-Sabo. *Neorganicheskaya kristallokhimiya* [Inorganic Crystal Chemistry]. Budapest, Akademiya nauk Vengrii, 1969, 504 p.
10. Biscoe J., Pincus A. G., Smith C. S., Jr., Warren B. E. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1941, Vol. 24, No. 4, pp. 116–119.
11. Rabiee S. M., Nazparvar N., Azizian M., Vashae D., Tayebi L. Effect of ion substitution on properties of bioactive glasses: a review. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 7241–7251.
12. Knyazyan N. B. Vliyaniye predkristallizatsionnogo fazovogo razdeleniya alyumosilikatnykh stekol na svoystva prozrachnoy steklokeramiki [Influence of pre-crystallization phase separation of aluminosilicate glasses on the properties of transparent glass ceramics]. *Khimiya i materialovedeniye: Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra*, 2018, part 2, pp. 48–53. (In Russ.).
13. Veresov A. G., Putlyaev V. I. Khimiya neorganicheskikh biomaterialov na osnove fosfatov kal'tsiya [Chemistry of Inorganic Biomaterials Based on Calcium Phosphates]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2004, vol. 63, pp. 52–64 = Veresov A. G., Putlyaev V. I. Chemistry of Inorganic Biomaterials Based on Calcium Phosphates. *Russian Chemical Journal*, 2004, Vol. 63, No. 4, pp. 52–64. (In Russ.).
14. Guseva E. V., Ta A. T., Bui S. V., Fesik E. V. Bioaktivnye stekloobraznye sistemy vida $\text{SiO}_2\text{-CaO-P}_2\text{O}_5$, dopirovannye soedineniyami tsinka(II) i margantsa(II): effektivnyy sintez i svoystva [Bioactive Glassy Systems of the $\text{SiO}_2\text{-CaO-P}_2\text{O}_5$ Type Doped with Zn(II) and Mn(II): Efficient Synthesis and Properties. *Khimicheskaya bezopasnost'* [Chemical Safety Science], 2023, Vol. 7, pp. 24–38. (In Russ.).
15. Portnova N. L., Zavertyaeva T. L., Soklakov A. I. Khimia i tekhnologiya kondensirovannykh fosfatov [Chemistry and Technology of Condensed Phosphates]. Alma-Ata, Nauka KazSSR, 1970, pp. 64–68.
16. Oganessian M. R., Knyazyan N. B. Sintez steklokristallicheskich materialov v sisteme $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ s vysokimi znacheniyami mikrotverdosti [Synthesis of glass-crystalline materials in the $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system with high microhardness values]. *Vestnik NPUA. Khimicheskie i prirodookhrannye tekhnologii*, 2019, no. 1, pp. 42–49.
17. Oganessian M. R., Oganessian R. M., Knyazyan N. B. Razrabotka stomatologicheskogo sitalla na osnove fosforsoederzhashchej alyumosilikatnoj sistemy [Development of dental glass-ceramic based on a phosphorus-containing aluminosilicate system]. *Vestnik NPU Armenii. Seriya: Khimicheskie i prirodookhrannye tekhnologii*, 2017, no. 2, pp. 9–17.

Информация об авторах

М. Р. Оганесян — соискатель;
Дж. Р. Еганян — соискатель;
Н. В. Яценко — аспирант;
Т. В. Григорян — старший научный сотрудник;
В. П. Тороян — научный сотрудник;
Е. В. Кумкумаджян — старший научный сотрудник;
К. К. Галоян — научный сотрудник;
Л. А. Гаспарян — старший научный сотрудник;
Г. Г. Манукян — ученый секретарь;
Н. Б. Князян — доктор технических наук, заведующий лабораторией.

Information about the authors

M. R. Hovhannisyan — Doctoral Candidate;
J. R. Yeganyan — Doctoral Candidate;
N. V. Iashchenko — Postgraduate Student;
T. V. Grigoryan — Senior Researcher;
V. P. Toroyan — Researcher;
E. V. Kumkumajian — Senior Researcher;
K. K. Galoyan — Researcher
L. A. Gasparian — Senior Researcher;
G. G. Manukyan — Academic Secretary;
N. B. Knyazyan — DSc (Engineering), Head of the Laboratory.

Статья поступила в редакцию 12.09.2025; одобрена после рецензирования 26.09.2025; принята к публикации 30.09.2025.
The article was submitted 12.09.2025; approved after reviewing 26.09.2025; accepted for publication 30.09.2025.