

Научная статья
УДК 546.883 + 616-006.04
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.007

ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

Михаил Азарьевич Медков¹, Дина Николаевна Грищенко²

^{1, 2}*Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия*

¹*medkov@ich.dvo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9417-0312>*

Аннотация

Представлен метод синтеза функциональных стеклокерамических материалов на основе Bioglass 45S5 пиролизом смеси органических растворов. Получены образцы биостекол, допированные оксидами циркония(IV) и тантала(V). Исследовано влияние допирования на свойства биостекол методами РФА, РЭМ, ЭДС. Установлено изменение физических и химических свойств Bioglass 45S5 с увеличением содержания функциональной добавки. Полученные материалы перспективны для современной медицины и могут быть использованы для восстановления костной ткани, а также для лечения злокачественных новообразований.

Ключевые слова:

стеклокерамика, диоксид циркония, пентоксид тантала, пиролиз органических растворов

Для цитирования:

Медков М. А., Грищенко Д. Н. Получение функциональных стеклокерамических материалов методом пиролиза органических растворов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 4. С. 44–50. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.007

Original article

OBTAINING FUNCTIONAL CERAMIC GLASS MATERIALS BY THE METHOD OF PYROLYSIS OF ORGANIC SOLUTIONS

Michael A. Medkov¹, Dina N. Grishchenko²

^{1, 2}*Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

¹*medkov@ich.dvo.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9417-0312>*

Abstract

The paper presents a method for the synthesis of functional glass-ceramic materials based on Bioglass 45S5 by pyrolysis of a mixture of organic solutions. Samples of bioglasses doped with zirconium(IV) and tantalum(V) oxides were obtained. The influence of doping on the properties of bioglasses was studied by the following methods: XRD, SEM, EDX. A change in the physical and chemical properties of Bioglass 45S5 with an increase in the content of a functional additive has been established. The obtained materials are promising for modern medicine and can be used to restore bone tissue, as well as to treat malignant neoplasms.

Keywords:

glass ceramics, zirconium dioxide, tantalum pentoxide, pyrolysis of organic solutions

For citation:

Medkov M. A., Grishchenko D. N. Obtaining functional ceramic glass materials by the method of pyrolysis of organic solutions // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 4. P. 44–50. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.4.007

Введение

Одно из самых известных биостекол — Bioglass 45S5. Оно считается остеокондуктивным, остеоиндуктивным и деградируемым. Биостекла можно применять в качестве материалов, восстанавливающих и устраняющих дефекты костных тканей [1]. Новые возможности для использования биостекол открывает допирование последних различными металлами. Допирование тяжелыми металлами (висмутом, вольфрамом, танталом) [2–4] делает их рентгеноконтрастными, что позволяет визуализировать процессы восстановления тканей. Изменяя состав биостекла, можно управлять его биоактивностью и резорбируемостью, что актуально в восстановительной хирургии костных тканей. Допированные биостекла используются для лечения онкологических заболеваний методами гипертермии и брахитерапии [5]. Для допирования используются оксид железа или радиоизотопы ¹³⁵Sm, ⁹⁰Sr и ⁹⁰Y, включенные в матрицу биорезорбируемых стекол. Создание препаратов, основанных на использовании частиц Ta₂O₅, представляет

особый интерес, так как тантал обладает низкой токсичностью и практически биоинертен. Разработка новых продуктов для клинического применения на основе биостекла Bioglass 45S5 является перспективным в настоящее время.

Результаты

Для получения биостекол нами выбран метод пиролиза органических растворов. Для создания Bioglass 45S5 использовали: тетраэтоксисилан, трибутилфосфат, олеат натрия и олеат кальция в смеси растворителей (скипидар и толуол). Для допирования применяли кристаллический оксид тантала(V) или раствор олеата циркония в толуоле. Допирование производится замещением общей массы Bioglass 45S5 допирующим компонентом для сохранения отношения Si/Na/Ca/P. Процесс изготовления стекла занимает около 6 ч и осуществляется при температуре 1300 °C [6, 7]. Рентгенофазовый анализ образцов с различным содержанием ZrO_2 после обжига прекурсора при 1300 °C обнаруживает фазы, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты рентгенофазового анализа образцов с ZrO_2

№ образца	Состав образца	Фазы после обжига прекурсора
1	Bioglass 45S5	Рентгеноаморфная
2	Bioglass 45S5 + 5 мас. % ZrO_2	То же
3	Bioglass 45S5 + 10 мас. % ZrO_2	»
4	Bioglass 45S5 + 20 мас. % ZrO_2	Рентгеноаморфная + $Na_2ZrSi_2O_7$
5	Bioglass 45S5 + 40 мас. % ZrO_2	Рентгеноаморфная + $Na_4Zr_2Si_3O_{12}$ + ZrO_2
6	Bioglass 45S5 + 60 мас. % ZrO_2	То же

Морфология полученных материалов представлена на рис. 1. С изменением содержания ZrO_2 в составе она меняется от прозрачной и однородной (см. рис. 1, а, б) до непрозрачной, состоящей из стеклофазы и частиц разной формы (см. рис. 1, д, е). Средний диаметр сферических частиц составляет 1 мкм, сторона ребра частиц кубической формы — 1,5 мкм. Энергодисперсионные спектры образовавшихся фаз свидетельствуют о следующей принадлежности частиц. Спектр, соответствующий сферическим частицам, содержит преимущественно линии циркония и относится к ZrO_2 . Спектр, соответствующий кубическим частицам, содержит преимущественно линии кремния, натрия, циркония и относится к $Na_4Zr_2Si_3O_{12}$. Стеклофаза характеризуется повышенным содержанием кальция и кремния. Она образует рентгеноаморфную фазу, являющуюся биоактивной.

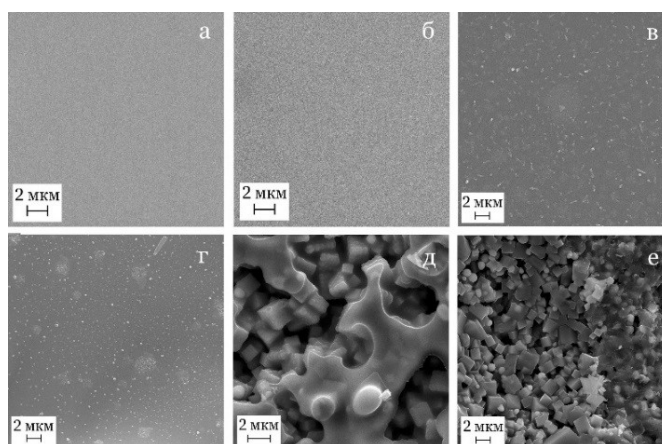


Рис. 1. Микрофотографии образцов:

а — № 1; б — № 2; в — № 3; г — № 4; д — № 5; е — № 6

Оценка влияния ZrO_2 на биологическую активность биостекла проведена *in vitro* с помощью модельной среды — SBF-раствора. Модельный раствор приготовлен в соответствии с процедурой,

предложенной в работе [8], pH доведен до 7,4. Все исследованные образцы после пребывания в SBF-растворе имеют покрытия в виде плотной растрескавшейся корки (рис. 2). Энергодисперсионные спектры покрытий свидетельствуют об образовании кальций-фосфатного слоя на поверхности стеклокерамики, что, в свою очередь, подтверждает биоактивность полученных материалов. Согласно нашим исследованиям, диоксид циркония частично выводит натрий и кремний из сетки стекла, образуя кристаллы $\text{Na}_2\text{ZrSi}_2\text{O}_7$ или $\text{Na}_4\text{Zr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (см. табл. 1). В результате содержание кальция, участвующего в формировании слоя апатита, в резорбируемом стекле остается на прежнем уровне. Очевидно, это является причиной сохранения биоактивности материала с увеличением содержания ZrO_2 .

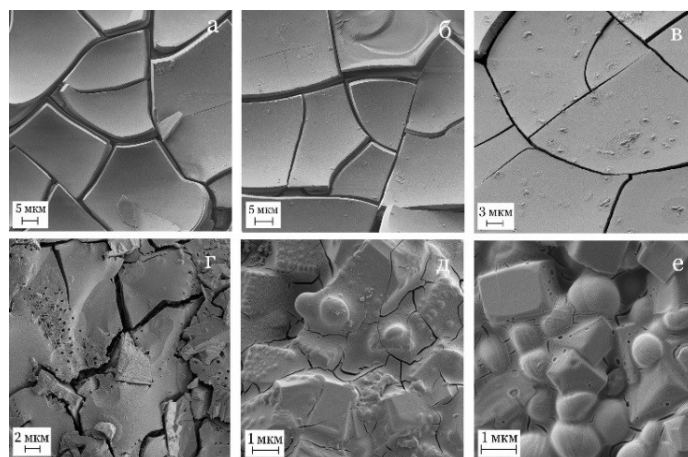


Рис. 2. Микрофотографии образцов после пребывания в SBF-растворе:
a — № 1; *б* — № 2; *в* — № 3; *г* — № 4; *д* — № 5; *е* — № 6

Исследована химическая растворимость полученных материалов в соответствии с ГОСТ ISO 10993-14-2011 [9] методом «экстремального раствора». Химическая растворимость падает при увеличении содержания ZrO_2 до 10 мас. % и растёт с последующим увеличением оксида допирующего элемента. Увеличение растворимости, вероятно, связано с изменением элементного состава стеклофазы за счет образования кристаллических цирконосиликатов. Частичное выведение натрия из сетки стекла в нерастворимую фазу должно снизить его высвобождение в живую ткань при деградации биоактивной фазы, что приведет к поддержанию более стабильного pH во время биохимических процессов вокруг имплантата. Полученные данные свидетельствуют об уменьшении скорости резорбции биостекла при увеличении содержания ZrO_2 до 10 мас. %. Это расширяет возможности выбора материалов для имплантации. Стекла, допированные диоксидом циркония, помогут решить проблему несоответствия скоростей деградации имплантируемого Bioglass 45S5 и роста костной ткани. Материал обладает рентгеноконтрастностью, повышенной прочностью, отсутствием токсичности и более низким значением pH по сравнению с нелегированным биостеклом. Он может быть использован для восстановительной хирургии в качестве ненагружаемых или слабонагружаемых имплантов, а также порошковых материалов для заполнения дефектов костной ткани. Прочная стеклокерамика может быть изготовлена методом холодного одноосного прессования измельченного порошка, полученного вышеуказанным способом, и обработана при температуре 1300 °C. Образец, содержащий 25 мас. % Bioglass 45S5 и 75 мас. % ZrO_2 , имеет прочность более 450 МПа и обладает биоактивной фазой. Материал пригоден для обработки и создания имплантата любой конфигурации без ущерба для биоактивности конструкции. Материал имеет потенциальное применение в инженерии костной ткани.

Нами показано [10], что образцы стекла с содержанием Ta_2O_5 до 4 мас. % рентгеноконтрастны и биоактивны. В работе [11] показано, что за счет допирования стекла оксидом тантала в количестве 3 мол. % (или 18 мас. %) его механические и физические свойства могут быть улучшены. Однако биологическую активность материал утрачивает. Для выяснения причин подавления биоактивности стекол нами получены образцы с содержанием оксида тантала до 40 мас. %. Рентгенофазовый анализ образцов с различным содержанием Ta_2O_5 после обжига прекурсора при 1300 °C содержит фазы, указанные в табл. 2.

Таблица 2

Результаты рентгенофазового анализа образцов с Ta_2O_5

№ образца	Состав образца	Фазы после обжига прекурсора
1	Bioglass 45S5	Рентгеноаморфная
2	Bioglass 45S5 + 3 мас. % Ta_2O_5	То же
3	Bioglass 45S5 + 5 мас. % Ta_2O_5	»
4	Bioglass 45S5 + 10 мас. % Ta_2O_5	»
5	Bioglass 45S5 + 20 мас. % Ta_2O_5	Рентгеноаморфная + CaTa_2O_6
6	Bioglass 45S5 + 30 мас. % Ta_2O_5	То же
7	Bioglass 45S5 + 40 мас. % Ta_2O_5	»

Образцы, содержащие до 10 мас. % Ta_2O_5 , прозрачны и однородны (рис. 3, а). Образцы с 20 %-м содержанием оксида тантала прозрачны, но выявлено присутствие кристаллов CaTa_2O_6 (см. рис. 3, б). Образцы с более высоким содержанием Ta_2O_5 непрозрачны, состоят из кристаллической фазы, равномерно распределенной в стеклофазе (см. рис. 3, в). Тонкозернистая структура в полученных ситаллах характеризуется наличием кристаллов кубической формы с длиной ребра 0,5–1 мкм. С помощью модельной среды (SBF-раствора) оценивалась биоактивность полученных образцов в сравнении с Bioglass 45S5.

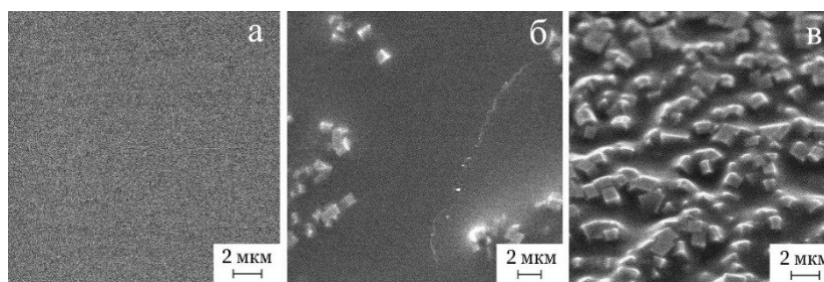


Рис. 3. Микрофотографии стекла, содержащего Ta_2O_5 : 10 мас. % (а); 20 мас. % (б); 40 мас. % (в)

Плотное покрытие, имеющее вид растрескавшейся корки, после 14-суточного пребывания в модельном растворе имеет Bioglass 45S5 (рис. 4, а). За тот же период на поверхности образцов, содержащих 3–5 мас. % Ta_2O_5 , образовались неплотные покрытия (см. рис. 4, б). Энергодисперсионные спектры покрытий соответствуют фосфатам кальция. Остальные образцы покрытия не имеют. После 25-суточного пребывания в модельном растворе на поверхности образца, содержащего 10 % Ta_2O_5 , наблюдались отдельные кальций-фосфатные частицы размером около 1 мкм (см. рис. 4, в). Образец, содержащий 20 % Ta_2O_5 , не имеет кальций-фосфатного покрытия. Полученные результаты подтверждают, что биоактивность образцов снижается с увеличением количества Ta_2O_5 в составе стекла 45S5. Основной причиной подавления биоактивности является постепенное выведение катионов кальция, участвующих в образовании биоактивного слоя, из сетки стекла в кристаллическую фазу CaTa_2O_6 . В результате этого в поверхностном слое не происходит пересыщения раствора SBF катионами кальция и кальцийфосфатный слой перестаёт осаждаться на поверхности образца. Образцы, содержащие 30 и 40 мас. % Ta_2O_5 , после пребывания в SBF-растворе в течение 25 сут значительно изменились. Стеклообразная фаза на поверхности образца растворилась, остались кристаллы CaTa_2O_6 (см. рис. 4, г). Образцы, содержащие в составе до 10 мас. % Ta_2O_5 могут быть использованы в восстановительной хирургии костной ткани в качестве имплантов, покрытий, а также порошковых материалов для лечения трещин травматического генезиса с визуализацией процессов введения материала и последующего восстановления ткани рентгенологическими методами.

Композиционный материал, содержащий микрокристаллы CaTa_2O_6 , исследован *in vivo* на способность к преодолению радиорезистентности злокачественных новообразований. Известно, что введение в опухоль радиосенсибилизаторов усиливает воздействие лучевой терапии при облучении благодаря генерации вторичного излучения. В [12] исследована *in vivo* возможность применения наночастиц

Ta_2O_5 для лечения новообразований. Получены результаты, подтверждающие эффективность их использования. Однако слишком высокая скорость выведения Ta_2O_5 из тканей (одни сутки) является отрицательным фактором в условиях длительного лечения заболевания. В целях эффективного проведения лучевой терапии проблему быстрого выведения частиц было решено преодолеть с помощью введения в опухоль препарата, состоящего из танталосодержащих кристаллов $SaTa_2O_6$, заключенных в матрицу биостекла. Процесс деградации биостекла в этом случае сопровождается постепенным высвобождением кристаллов $SaTa_2O_6$. В отличие от наночастиц Ta_2O_5 , кристаллы будут задерживаться в тканях для поддержания эффективной лучевой терапии.

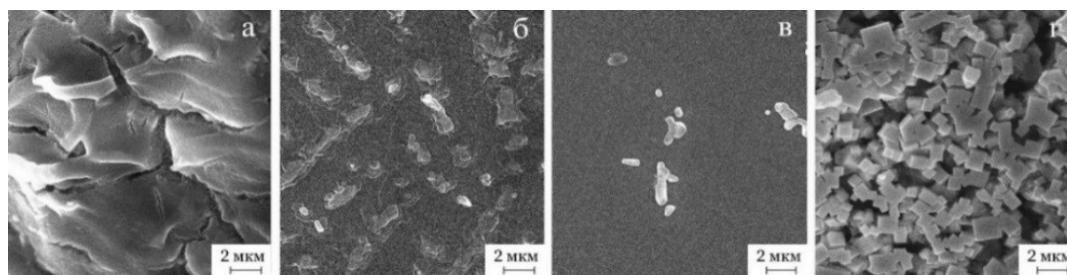


Рис. 4. Микрофотографии стекла, содержащего Ta_2O_5 (мас. %): 0 (а); 3 (б); 10 (в); 40 Ta_2O_5 (з), после пребывания в SBF-растворе

Методом Monte-Karlo было проведено моделирование генерации вторичного ионизирующего излучения в условиях генерации первичного высокоэнергетического излучения с энергией фотонов 6 МэВ. На рис. 5 представлены показатели генерации вторичного излучения в зависимости от расстояния до поверхности исследуемого образца. Исходя из полученных данных, максимальное значение вторичного излучения получено у поверхности образца стеклокерамики, содержащей 40 мас. % оксида тантала. Тактика эксперимента: суспензию из композита с 40 мас. % Ta_2O_5 вводят непосредственно в место опухоли и проводят сеанс лучевой терапии (аппарат True Beam фирмы Varian с применением болуса с энергией фотонов до 6 МэВ, одной фракцией, СОД 20 Гр ионизирующего излучения). Результативность исследуемого препарата оценивали по продолжительности жизни животных в группах, отличающихся способом лечения опухоли: группа 1 — проводили облучение локально, в области опухоли; группа 2 — в область опухоли вводили экспериментальную суспензию с последующим облучением [13].

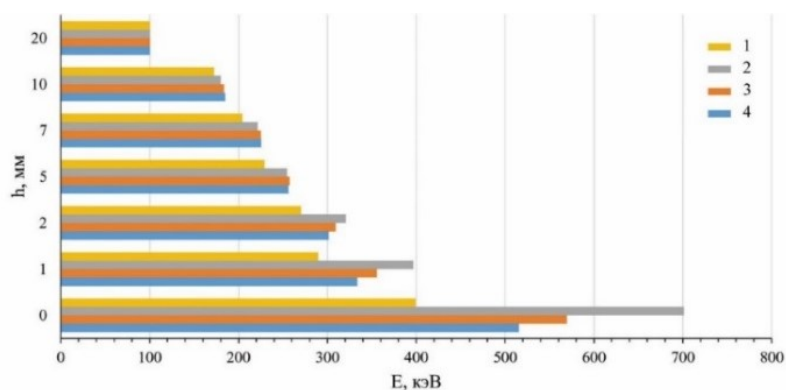


Рис. 5. Показатели генерации вторичного ионизирующего излучения на различных образцах:
1 — дистиллированная вода; 2 — биостекло, содержащее 40 мас. % Ta_2O_5 ; 3 — биостекло, содержащее 20 мас. % Ta_2O_5 ; 4 — биостекло

На рисунке 6 представлена зависимость продолжительности жизни животных от способа лечения опухоли. Было установлено, что в группе 1 средняя продолжительность жизни животных составила $14,9 \pm 3,3$ дня, медиана выживаемости 11 дней. В группе 2 средняя продолжительность жизни животных $38,6 \pm 3,3$ дней, медиана выживаемости 39 дней. При использовании экспериментальной

суспензии прибавка к средней выживаемости составила 28 дней. Таким образом, суспензия, содержащая стеклокерамику с микрочастицами CaTa_2O_6 , повышает эффективность однократной дозы облучения. За счет двухфазного состава достигается пролонгированное присутствие препарата в зоне инъекции. Комбинация биостекла и оксида тантала является перспективной при создании препарата для локальной радиомодификации больных, нуждающихся в лучевой терапии при лечении злокачественных новообразований.

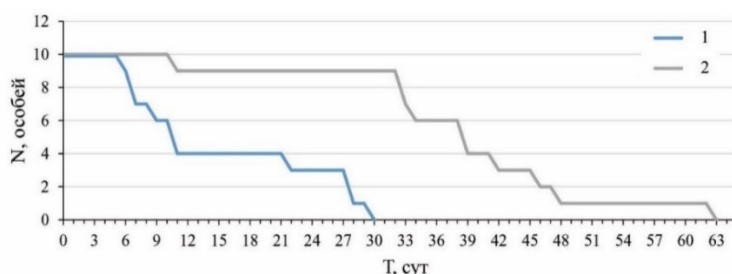


Рис. 6. Кривые выживаемости животных в различных группах:
1 — группа 1; 2 — группа 2

Выводы

Разработаны новые продукты на основе биостекла Bioglass 45S5 для клинического применения. Получены материалы, имеющие потенциальную возможность для использования в инженерии костной ткани, а также при лечении злокачественных новообразований. Состав не представляет угрозы радиоактивного заражения организма и снижает вероятность возникновения лучевых осложнений в здоровых тканях, что позволяет эффективно проводить лечение.

Список источников

1. Rahaman M. N., Day D. E., Bal B. S., Fu Q., Jung S. B., Bonewald L. F., Tomsia A. P. Bioactive glass in tissue engineering // *Acta Biomater.* 2011. V. 7, No. 6. P. 2355–2373.
2. Grishchenko D. N., Papynov E. K., and Medkov M. A. Using the Extraction–Pyrolysis Method in Synthesis of Bioactive Glass // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2021. V. 55, No. 5. P. 1002–1009.
3. Медков М. А., Грищенко Д. Н., Курявый В. Г., Слободюк А. Б. Вольфрам-содержащие рентгеноконтрастные биоактивные стекла: получение и свойства // *Стекло и керамика.* 2018. № 8. С. 40–45.
4. Грищенко Д. Н., Голуб А. В., Курявый В. Г., Шлык Д. Х., Медков М. А. Биоактивная керамика на основе ZrO_2 , легированная Ta_2O_5 : получение и свойства // *Журн. неорг. хим.* 2021. Т. 66, № 10. С. 1497–1504.
5. Aspasio R. D., Borges R., Marchi J. Biocompatible Glasses for Cancer Treatment // *Biocompatible Glasses. Advanced Structured Materials.* 2016. V. 53. P. 249–265.
6. Грищенко Д. Н., Слободюк А. Б., Курявый В. Г., Медков М. А. Танталсодержащая биоактивная стеклокерамика: механизм подавления биологической активности стекла 45S5 при его легировании Ta_2O_5 // *Журн. неорг. хим.* 2020. Т. 65, № 10. С. 1408–1415.
7. Грищенко Д. Н., Дмитриева Е. Э., Федорец А. Н., Медков М. А. Биостекло 45S5, легированное диоксидом циркония: получение и свойства // *Журн. неорг. хим.* 2022. Т. 67, № 1. С. 127–136.
8. Kokubo T., Takadama H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity? // *Biomaterials.* 2006. V. 27, No. 15. P. 2907–2915.
9. ГОСТ ISO 10993-14-2011. Изделия медицинские. Оценка биологического действия медицинских изделий. Ч. 14. Идентификация и количественное определение продуктов деградации изделий из керамики. М.: Стандартинформ, 2013. С. 18.
10. Medkov M. A., Grishchenko D. N., Dmitrieva E. E., Kudryavyi V. G. Obtaining Bioactive Glasses by the Pyrolysis of Organic Solutions // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2020. V. 54, No. 4. P. 1005–1009.
11. Riaz M., Zia R., Saleemi F., Bashir F., Ahmad R., Hossain T. Influence of Ta_2O_5 doping on mechanical and biological properties of silicate glass-ceramics // *Materials Science-Poland.* 2016. V. 34, No. 1. P. 13–18.
12. Лукьяненко К. С., Апанасевич В. И., Лагуева А. В., Плотникова О. С., Панкратов И. В., Рудюк В. П., Стебунов Л. С., Чернобаев А. А., Лукьянов П. А., Давыдова В. Н., Медков М. А., Кустов В. В., Темченко В. В. Возможность генерации вторичного ионизирующего излучения на наночастицах оксида тантала при лучевой терапии злокачественных новообразований // *Тихоокеанский медицинский журнал.* 2016. Т. 61, № 4. С. 38–39.

13. Плотникова О. С., Грищенко Д. Н., Медков М. А., Апанасевич В. И., Панкратов И. В., Невожай В. И., Полежаев А. А., Костив Е. П. Рентгеноконтрастная стеклокерамика с микрокристаллами танталата кальция для лечения злокачественных новообразований // Журн. неорг. хим. 2022. Т. 67, № 9. С. 1219–1224.

References

1. Rahaman M. N., Day D. E., Bal B. S., Fu Q., Jung S. B., Bonewald L. F., Tomsia A. P. Bioactive glass in tissue engineering. *Acta Biomater*, 2011, vol. 7, no. 6, pp. 2355–2373.
2. Grishchenko D. N., Papynov E. K., Medkov M. A. Using the Extraction–Pyrolysis Method in Synthesis of Bioactive Glass. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 5, pp. 1002–1009.
3. Medkov M. A., Grishchenko D. N., Kuryavyi V. G., Slobodyuk A. B.. Vol'fram-soderzhashchie rentgenokonstrastnye bioaktivnye stekla: poluchenie i svoystva [Tungsten-Containing Bioactive Radiocontrast Glass: Production and Properties]. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2018, vol. 75, no. 7, pp. 322–326. (In Russ.).
4. Grishchenko D. N., Golub A. V., Kuryavyi V. G., Shlyk D. Kh., Medkov M. A. Bioactive Ceramics Based on ZrO_2 Doped with Ta_2O_5 : Preparation and Properties. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2021, vol. 66, no. 10, pp. 1592–1599.
5. Aspasio R. D., Borges R., Marchi J. Biocompatible Glasses for Cancer Treatment. *Biocompatible Glasses. Advanced Structured Materials*, 2016, vol. 53, pp. 249–265.
6. Grishchenko D. N., Slobodyuk A. B., Kuryavyi V. G., Medkov M. A. Tantalum-Containing Bioactive Glass-Ceramics: A Mechanism of Suppression of the Biological Activity of the 45S5 Bioglass by Doping with Ta_2O_5 . *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2020, vol. 65, no. 10, pp. 1606–1613.
7. Grishchenko D. N., Dmitrieva E. E., Fedorets A. N., Medkov M. A. Bioglass 45S5 Doped with Zirconium Dioxide: Preparation and Properties. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, vol. 67, pp. 114–122.
8. Kokubo T., Takadama H. How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity. *Biomaterials*, 2006, vol. 27, no. 15, pp. 2907–2915.
9. GOST ISO 10993-14-2011. *Izdeliya medicinskie. Ocenka biologicheskogo dejstviya medicinskih izdelij. Ch. 14. Identifikaciya i kolichestvennoe opredelenie produktov degradacii izdelij iz keramiki* [Medical products. Assessment of the biological effect of medical devices. Part 14. Identification and quantitative determination of degradation products of ceramic products]. Moscow, Standartinform, 2013, p. 18. (In Russ.).
10. Medkov M. A., Grishchenko D. N., Dmitrieva E. E., Kudryavyi V. G. Obtaining Bioactive Glasses by the Pyrolysis of Organic Solutions. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, vol. 54, no. 4, pp. 1005–1009.
11. Riaz M., Zia R., Saleemi F., Bashir F., Ahmad R., Hossain T. Influence of Ta_2O_5 doping on mechanical and biological properties of silicate glass-ceramics. *Materials Science-Poland*, 2016, vol. 34, no. 1, pp. 13–18.
12. Lukyanenko K. S., Apanasevich V. I., Lagureva A. V., Plotnikova O. S., Pankratov I. V., Rudyuk V. P., Stebunov L. S., Chernobaev A. A., Lykanov P. A., Davydova V. N., Medkov M. A., Kustov V. N., Temchenko V. V. Vozmozhnost' generacii vtorichnogo ioniziruyushchego izlucheniya na nanochastichakh oksida tantala pri luchevoj terapii zlokachestvennykh novoobrazovaniy [The possibility of generating secondary ionizing radiation on tantalum oxide nanoparticles during radiation therapy of malignant neoplasms]. *Tikhookeanskij medicinskij zhurnal* [Pacific Medical Journal], 2016, vol. 61, no. 4, pp. 38–39. (In Russ.).
13. Plotnikova O. S., Grishchenko D. N., Medkov M. A., Apanasevich V. I., Pankratov I. V., Nevozhai V. I., Polezhaev A. A., Kostiv E. P. Radiopaque Glass Ceramic with Calcium Tantalate Microcrystals for the Treatment of Malignant Neoplasms. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, vol. 67, no. 9, pp. 1356–1360.

Информация об авторах

М. А. Медков — доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией;
Д. Н. Грищенко — кандидат химических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

M. A. Medkov — Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Head of laboratory;
D. N. Grishchenko — PhD (Chemistry), Senior scientific worker.

Статья поступила в редакцию 05.02.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 14.02.2023.
The article was submitted 05.02.2023; approved after reviewing 13.02.2023; accepted for publication 14.02.2023.