

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 546.41-31/546.284-31

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.007

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ НА ОСНОВЕ БИОСТЕКЛА SiO<sub>2</sub>-CaO

Дарья Николаевна Лыткина<sup>1</sup>, Арина Борисовна Зубовская<sup>2</sup>, Рустам Талгатovich Садыков<sup>3</sup>, Шоре Машайехан<sup>4</sup>, Ирина Александровна Курзина<sup>5</sup>

Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, 634050, Томск, Россия  
Технологический университет имени Шарифа, Азади авеню, 11365-8639, Тегеран, Иран

<sup>1</sup>lytkinadn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7458-6265>

<sup>2</sup>arnvrnes@gmail.com

<sup>3</sup>nate\_river\_2017@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0821-3292>

<sup>4</sup>mashayekhan@sharif.edu <https://orcid.org/0000-0002-5479-5625>

<sup>5</sup>kurzina99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4976-2295>

**Аннотация.** Всемирная организация здравоохранения отмечает значительный рост доли костно-мышечных заболеваний как причины потери лет здоровой жизни, что подчеркивает необходимость разработки эффективных стратегий регенерации костной ткани. Особую актуальность приобретает проблема остеопороза, занимающего четвертое место среди неинфекционных заболеваний. Традиционные методы лечения, включая аутотрансплантацию, обладают существенными ограничениями, такими как дефицит донорского материала и риск осложнений. В связи с этим перспективным направлением является создание синтетических биоматериалов, способных воспроизводить структуру и функцию натуральной костной ткани. Ключевыми требованиями к таким материалам являются оптимальная пористость, механическая прочность и биоактивность. Особый интерес представляют композиты на основе биоактивного стекла (БС), демонстрирующие высокий остеогенный потенциал. Модификация БС аминокислотами, в частности глицином, открывает новые возможности для управления морфологией и функциональными свойствами материала. Однако механизмы взаимодействия аминокислот с поверхностью БС остаются недостаточно изученными, что ограничивает целенаправленный дизайн таких систем. В работе представлен синтез и характеристика композитных материалов на основе биоактивного стекла системы SiO<sub>2</sub>-CaO (60/40 мол.%), модифицированного биоактивным компонентом. Для характеристики материалов применяли комплекс физико-химических методов: сканирующую электронную микроскопию, рентгенофазовый анализ для определения кристаллической структуры, ИК-спектроскопию для идентификации функциональных групп, низкотемпературную десорбцию азота для оценки удельной поверхности и пористости. Клеточную жизнеспособность определяли через 6 суток инкубации с образцами с помощью флуоресцентного теста Alamar Blue. Полученные результаты демонстрируют перспективность разработанных композитных материалов для применения в регенеративной медицине. Установлено, что параметры синтеза и модификация поверхности материалов существенно влияют на морфологию, пористую структуру и биологическую активность материалов. Цель настоящего исследования – разработка композитных материалов на основе системы SiO<sub>2</sub>-CaO и комплексное изучение их физико-химических и биомедицинских характеристик.

**Ключевые слова:** биостекло, восстановление костной ткани, биосовместимость.

**Благодарности:** исследование поддержано грантом РФФ 24-43-20044.

---

**Для цитирования:** Лыткина Д.Н., Зубовская А.Б., Садыков Р.Т., Машайехан Ш., Курзина И.А. Получение пористых материалов для восстановления костных тканей на основе биостекла sio<sub>2</sub>-cao // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 3. С. 312-323. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.007.

---

Original article

## THE OBTAINING OF POROUS MATERIALS BASED ON $\text{SiO}_2\text{-CAO}$ BIOGLASS FOR BONE TISSUE REGENERATION

Daria N. Lytkina<sup>1</sup>, Arina B. Zubovskaya<sup>2</sup>, Rustam T. Sadykov<sup>3</sup>, Shohreh Mashayekhan<sup>4</sup>,  
Irina A. Kurzina<sup>5</sup>

<sup>1, 3, 4, 5</sup> National research Tomsk State University, Lenin ave., 36, 634050, Tomsk, Russian Federation

<sup>4</sup> Sharif University of Technology, Azadi Ave, 11365-8639, Tehran, Iran

<sup>1</sup> lytkinadn@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7458-6265

<sup>2</sup> arnvrnes@gmail.com

<sup>3</sup> nate\_river\_2017@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0821-3292

<sup>4</sup> mashayekhan@sharif.edu, ORCID: 0000-0002-5479-5625

<sup>5</sup> kurzina99@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4976-2295

**Abstract.** The World Health Organization notes a significant increase in the proportion of musculoskeletal diseases as a cause of loss of healthy life years, which emphasizes the need to develop effective strategies for bone tissue regeneration. The problem of osteoporosis, which ranks fourth among non-communicable diseases, is of particular relevance. Traditional methods of treatment, including autotransplantation, have significant limitations, such as a shortage of donor material and the risk of complications. In this regard, a promising direction is the creation of synthetic biomaterials capable of reproducing the structure and function of natural bone tissue. The key requirements for such materials are optimal porosity, mechanical strength and bioactivity. Of particular interest are composites based on bioactive glass (BG), demonstrating high osteogenic potential. Modification of BG with amino acids, in particular glycine, opens up new possibilities for controlling the morphology and functional properties of the material. However, the mechanisms of interaction of amino acids with the BG surface remain insufficiently studied, which limits the targeted design of such systems. The paper presents the synthesis and characterization of composite materials based on bioactive glass of the  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$  (60/40 mol.%) system modified with bioactive substance. A set of physicochemical methods was used to characterize the materials: scanning electron microscopy, X-ray phase analysis to determine the crystal structure, IR spectroscopy to identify functional groups, low-temperature nitrogen adsorption to assess the specific surface area and porosity. Cell viability was determined after 6 days of incubation with samples using the Alamar Blue fluorescent test. The results demonstrate the promise of the developed composite materials for use in regenerative medicine. It has been established that the parameters of synthesis and surface modification of materials significantly affect the morphology, porous structure and biological activity of materials. The purpose of this study is to develop composite materials based on the  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$  system and comprehensively study their physicochemical and biomedical characteristics.

**Keywords:** bioglass, bone tissue restoration, biocompatibility.

**Acknowledgements:** the research was supported by the Russian Science Foundation grant 24-43-20044.

**For citation:** Lytkina D.N., Zubovskaya A.B., Sadykov R.T., Mashayekhan Sh., Kurzina I. A. (2025). The obtaining of porous materials based on  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$  bioglass for bone tissue regeneration. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(3), 312-323. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.007.

### Введение

Согласно последним данным исследования «Глобальное бремя болезней», заболевания опорно-двигательной системы затрагивают примерно 1,71 миллиарда человек по всему миру [1]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, доля заболеваний костно-мышечной системы как причина потери здоровых лет жизни значительно возросла с 1990 по 2010 годы, что подчёркивает необходимость разработки эффективных методов ле-

чения и восстановления костной ткани. С увеличением продолжительности жизни возрастает число возрастных заболеваний, таких как остеопороз, который, по данным ВОЗ, занимает четвёртое место среди наиболее распространённых неинфекционных заболеваний [2]. Традиционные методы лечения, такие как ауто-трансплантация, сопряжены с дефицитом донорского материала и риском осложнений. В связи с этим возрастает интерес к разработке синтетических материалов, способных заме-

нить костную ткань и стимулировать её регенерацию [3].

Биоматериал для регенерации костных тканей должен совмещать в себе такие свойства как: пористость, прочность и стабильность, что является технически сложно реализуемым. На начальных этапах развития имплантологии и регенеративной медицины приоритет отдавался использованию биологически инертных материалов, обладающих минимальной токсичностью и высокой устойчивостью к воздействию биологических сред [4]. Однако биоинертные материалы нашли лишь ограниченное применение в реконструктивно-восстановительной хирургии из-за неизбежных реакций отторжения. Необходимость создания материалов, способных сочетать в себе не только опорную функцию, но и биосовместиморегенеративную, определяет актуальность направления синтеза биосовместимых материалов, сочетающих в себе неорганическую, органическую и полимерную компоненты и исследование их свойств. Современные исследования сосредоточены на создании пористых материалов, моделирующих параметры натуральной кости или создающих условия ее успешной остеоинтеграции с имплантатом [5]. В частности, материалы на основе биостекла (БС) демонстрируют перспективные результаты в восстановлении костных дефектов [6]. Биоактивное стекло, разработанное Ларри Хенчем в 1969 году, активно используется как компонент композитов путем адаптации его фазового состава и моделирования таким образом его свойств [7]. Согласно существующей гипотезе, ключевым и не до конца изученным механизмом кристаллизации в организме является адсорбция аминокислот (АК) на неорганических компонентах биологических жидкостей [8, 9]. В этом контексте интерес представляют биоматериалы на основе БС модифицированные аминокислотами как на этапе синтеза, так и методами импрегнации [10, 11]. Проблема заключается в недостаточной изученности механизмов взаимодействия АК с поверхностью материалов и отсутствии единого подхода к изучению данных процессов, что ограничивает возможности управляемой модификации биоматериалов этими соединениями. Относительно новое направление исследований в области биоматериалов требует углубленного понимания взаимодействия между поверхностью материала и биологическим окружением, особенно с учетом

влияния таких соединений, как аминокислоты. Модификация материалов на основе биостекла глицином (Гли) может способствовать изменению морфологии и состава поверхности, что позволит улучшить биосовместимость композиционного материала и контролировать его физико-химические свойства.

Целью работы являлось получение композитных материалов на основе биостекла системы  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$  и исследование их физико-химических и функциональных свойств.

### Методы и материалы

Процесс золь-гель синтеза БС проводился на магнитной мешалке. После приготовления прозрачного водного раствора гексадецилтриметиламмония бромида 2 масс. % (ЦТАБ) путем перемешивания в дистиллированной воде при  $55\text{ }^\circ\text{C}$ , в реакционный сосуд по каплям добавляли 8 мл этилацетата. После 30 минут перемешивания вводили 25 % раствор аммиака ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) для регулирования pH раствора. Затем раствор перемешивали еще 15 минут. На этом этапе добавляли 2,88 мл тетраэтоксисилана ( $\text{TЭОС}$ ) и 0,53 г тетрагидрата соли нитрата кальция ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) с интервалом в 30 минут для получения образцов с определенным мольным соотношением компонентов системы  $\text{SiO}_2\text{-CaO}$  60/40 мол. %.

Были получены четыре серии образцов, для чего коллоидные частицы извлекали из реакционной смеси путём центрифугирования при скорости 7000 об/мин в течение 20 минут, осуществляемого через 2 (БС1), 3 (БС2) и 4 (БС3) часа после начала синтеза, а также после дополнительной выдержки в маточном растворе в течение 48 часов (БС4). Осаждённые частицы подвергали последовательной промывке дистиллированной водой и этиловым спиртом, что позволяло удалить остатки реагентов и побочные продукты. После этого образцы сушили при  $70\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 12 часов для удаления влаги. На заключительном этапе порошок биоактивных наночастиц подвергали термической обработке в муфельной печи при  $700\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 4 часов для стабилизации структуры материала.

Для получения композитов БС-Гли полученный порошок биостекла погружали в 2%-ый раствор глицина в течение 1ч при  $60\text{ }^\circ\text{C}$  с последующей двухчасовой обработкой в сушильном шкафу при  $150\text{ }^\circ\text{C}$ .

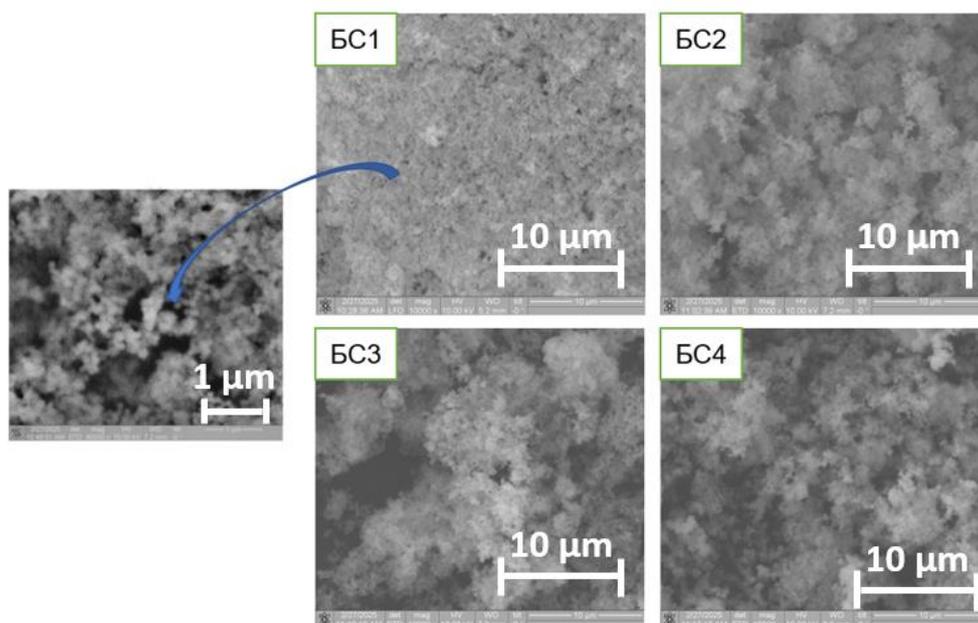
Морфологию поверхности и размер частиц исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе Hitachi TM – 3000. Идентификацию фазового состава образцов проводили с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре XRD-6000. Состав функциональных групп определяли методом ИК-спектроскопии на приборе Nicolet 670. Анализ удельной площади поверхности и пористости был проведен методом низкотемпературной адсорбции газа. В качестве адсорбционного газа был использован азот. Исследование проводилось при помощи анализатора удельной поверхности TriStar II 3020. Температура жидкого азота при регистрации равновесной изотермы адсорбции азота  $T = 77,350$  К. Дегазация проводилась в течении двух часов, при  $100$  °С под вакуумом,  $P = 0,2$  мбар.

Оценку жизнеспособности клеток иммунной системы после инкубирования на поверхности исследуемых материалов проводили с использованием моноцитов. Моноциты выделяли из крови трех доноров, исследование проведено в соответствии с положениями Хельсинкской декларации и одобрено этическим комитетом Томского государственного университета. Информированное согласие было полу-

чено от всех участников исследования. Получено письменное информированное согласие на публикацию данной статьи. Инкубирование образцов проводили при  $37$  °С в течение 6 суток. После этого из каждой лунки отбирали супернатант, оставив в лунке 500 мкл среды с клетками. Дополнительно в лунки добавили 50 мкл реактива Alamar Blue (объемное соотношение Alamar Blue/клеточная среда 1/10). Клетки с Alamar Blue инкубировали в течение 3-х часов при температуре  $37$  °С в темном месте. После инкубации в 96-и луночный планшет вносили клеточную среду с Alamar Blue (три лунки для каждого образца). Интенсивность сигнала флуоресценции измеряли с помощью микроридера Tecan Infinite 200 при длине волны 540 нм [12]. При попадании в живую клетку активный компонент индикатора резазурин преобразуется в резорурфин – вещество, которое обладает ярко выраженной флуоресценцией в красной области. Таким образом, метод позволяет провести сравнительный анализ жизнеспособности клеток и оценить ее количественно [13].

#### Результаты эксперимента и обсуждение

Для образцов БС были получены СЭМ-изображения (рис. 1).



**Рис.1.** СЭМ изображения поверхности частиц БС, полученных через: 1 – 2 часа синтеза (БС1); 2 – 3 часа синтеза (БС2); 3 – 4 часа синтеза (БС3); 4 – маточный раствор выдержанный 48 часов (БС4)

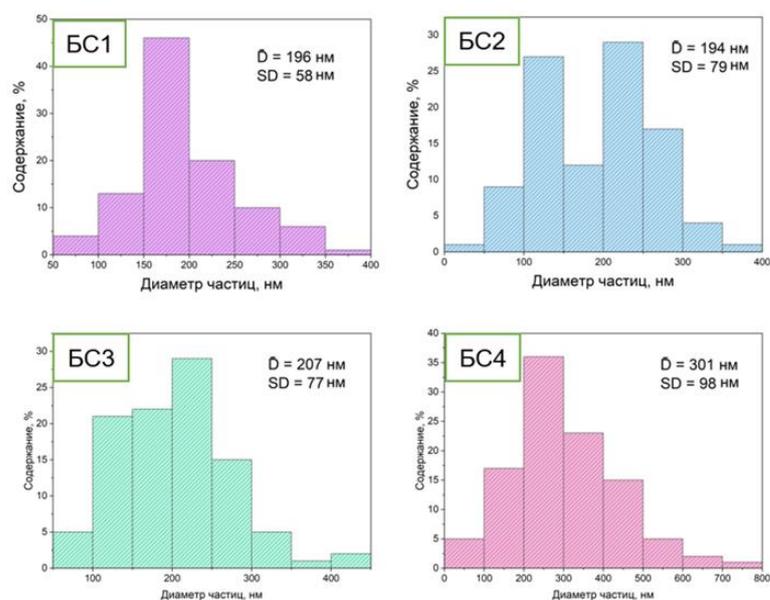
**Fig. 1.** SEM images of the surface of BG particles obtained after: 1 – 2 hours of synthesis (BG1); 2 – 3 hours of synthesis (BG2); 3 – 4 hours of synthesis (BG3); 4 – mother liquor aged for 48 hours (BG4)

На всех микрофотографиях отчётливо прослеживается сферическая морфология частиц, независимо от продолжительности синтеза. При увеличении времени реакции наблюдается рост частиц и их агрегация, что, вероятно, связано с развитием конденсационных процессов и укрупнением мицеллярных структур, сформированных в присутствии шаблонного агента.

На основании анализа гистограмм распределения частиц по размерам (рис. 2) установлено, что средний размер частиц может варьироваться в зависимости от времени синтеза. Для образцов БС1–БС3, полученных с выдержкой от 2 до 4 часов, средний диаметр частиц нахо-

дится в пределах 194–207 нм. При этом с увеличением времени синтеза наблюдается тенденция к росту частиц, что согласуется с механизмом постепенного укрупнения мицелл и формирующихся наноструктур.

Образец БС4, полученный из маточного раствора после 48 часов выдержки, демонстрирует существенно больший средний диаметр – порядка 301 нм – и более широкое распределение частиц по размерам ( $SD = 98$  нм). Это может свидетельствовать о снижении устойчивости системы во времени и выраженной склонности частиц к агрегации.



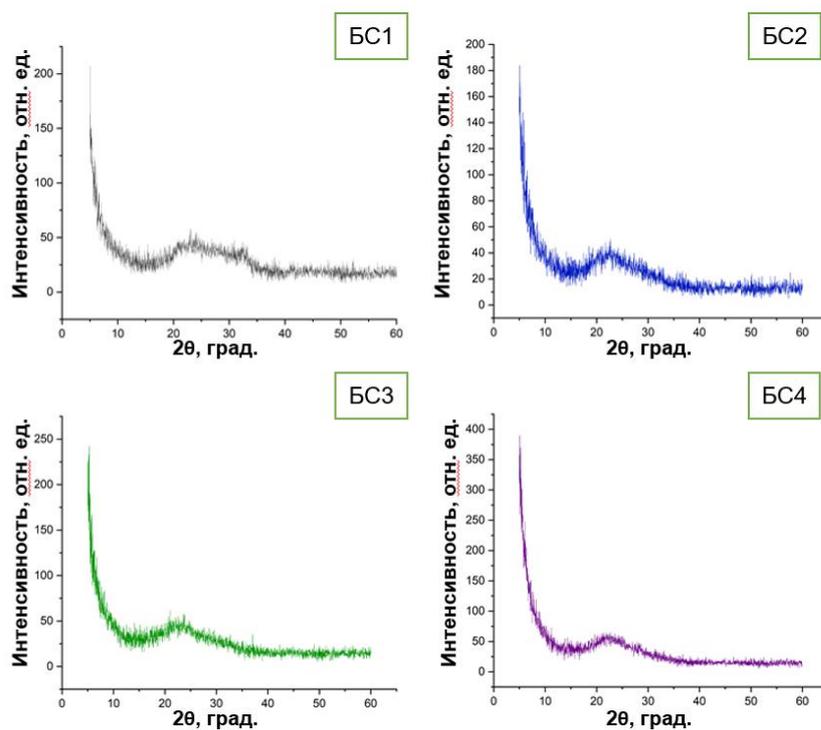
**Рис.2.** Гистограммы распределения частиц по размерам на поверхности БС, полученных через: БС1 – 2 часа синтеза; БС2 – 3 часа синтеза; БС3 – 4 часа синтеза; БС4 – маточный раствор выдержанный 48 часов

**Fig. 2.** Histograms of particle size distribution on the BG surface obtained after: BG1 – 2 hours of synthesis; BG2 – 3 hours of synthesis; BG3 – 4 hours of synthesis; BG4 – mother liquor aged for 48 hours

Полученные результаты подтверждают возможность целенаправленного контроля размеров частиц за счёт варьирования параметров синтеза.

Для подтверждения аморфной структуры синтезированных образцов БС был проведён рентгенофазовый анализ (рис. 3). Во всех дифрактограммах образцов БС1–БС4 наблюдается широкий пик в области  $2\theta \approx 23^\circ$ , что характерно для аморфных силикатных структур. От-

сутствие чётких дифракционных пиков свидетельствует об отсутствии кристаллических фаз, что подтверждает стеклообразную природу полученных материалов. Данные РФА в совокупности с результатами СЭМ и анализа распределения частиц по размерам подтверждают, что в исследуемых условиях удалось получить однородные аморфные структуры с регулируемыми морфологическими характеристиками.

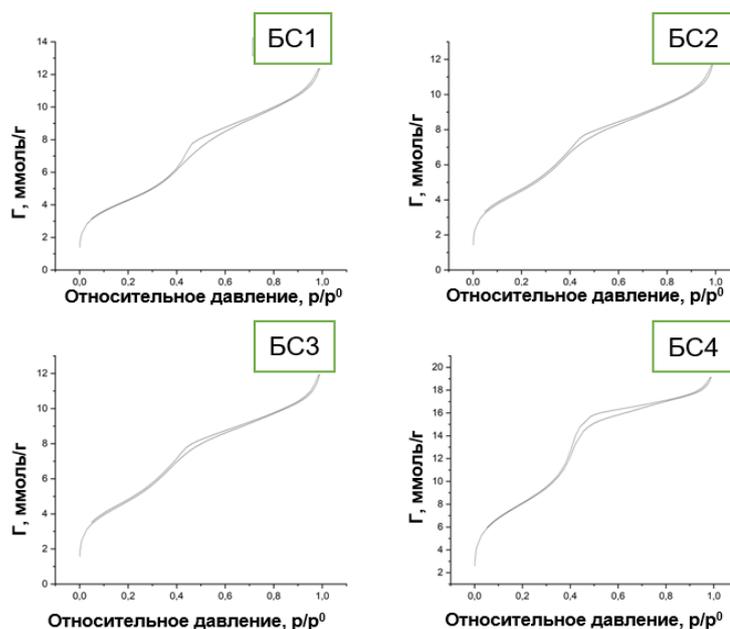


**Рис.3.** Данные РФА анализа для образцов, полученных через: BC1 – 2 часа синтеза; BC2 – 3 часа синтеза; BC3 – 4 часа синтеза; BC4 – маточный раствор выдержанный 48 часов

**Fig. 3.** XRD analysis data for samples obtained after: BG1 – 2 hours of synthesis; BG2 – 3 hours of synthesis; BG3 – 4 hours of synthesis; BG4 – mother liquor aged for 48 hours

Для оценки удельной площади поверхности ( $S_{уд}$ ), и объёма и диаметра пор полученных образцов BC были проведены исследования низкотемпературной адсорбции-десорбции азота (рис. 4). Изотермы всех образцов соответ-

ствуют типу IV по классификации IUPAC [14], что указывает на мезопористую структуру материалов. Характерная петля гистерезиса свидетельствует о наличии капиллярной конденсации в мезопорах.



**Рис.4.** Изотермы адсорбции  $N_2$  для образцов БС системы  $SiO_2$ -CaO при 77 К: BC1 – 2 часа синтеза; BC2 – 3 часа синтеза; BC3 – 4 часа синтеза; BC4 – маточный раствор выдержанный 48 часов

**Fig. 4.**  $N_2$  adsorption isotherms for BG samples of the  $SiO_2$ -CaO system at 77 K: BG1 – 2 hours of synthesis; BG2 – 3 hours of synthesis; BG3 – 4 hours of synthesis; BG4 – mother liquor aged for 48 hours

Наибольшая  $S_{уд}$  была зафиксирована у образца BC4 (659,45  $m^2/g$ ), полученного из маточного раствора (таблица 1). Это значение почти в два раза превышает показатели для других образцов (348–395  $m^2/g$ ), что может быть связано с продолжительным временем формирования пористой структуры и более выраженной

самоорганизацией частиц в коллоидной среде. Однако для данного образца также характерны более низкие значения среднего диаметра пор как по данным ВЖН (3,64 нм), так и по методу Хорвата-Кавазое (1,38 нм), что может свидетельствовать о более плотной упаковке и частичной агрегации (рис. 5, 6).

**Табл.1.** Площадь удельной поверхности БС: BC1 – 2 часа синтеза; BC2 – 3 часа синтеза; BC3 – 4 часа синтеза; BC4 – маточный раствор выдержанный 48 часов

**Table 1.** Specific surface area of BG: BG1 – 2 hours of synthesis; BG2 – 3 hours of synthesis; BG3 – 4 hours of synthesis; BG4 – mother liquor aged for 48 hours

Образец	$S_{уд}$ , площадь поверхности BET, $m^2/g$	Объем пор (ВЖН), $cm^3/g$	Средний диаметр пор (ВЖН), нм	Объем пор (НК), $cm^3/g$	Средний диаметр пор (НК), нм
BC1	348,45	0,44	4,49	0,16	1,37
BC2	377,86	0,40	4,10	0,17	1,41
BC3	394,78	0,39	4,02	0,18	1,39
BC4	659,45	0,71	3,64	0,30	1,38

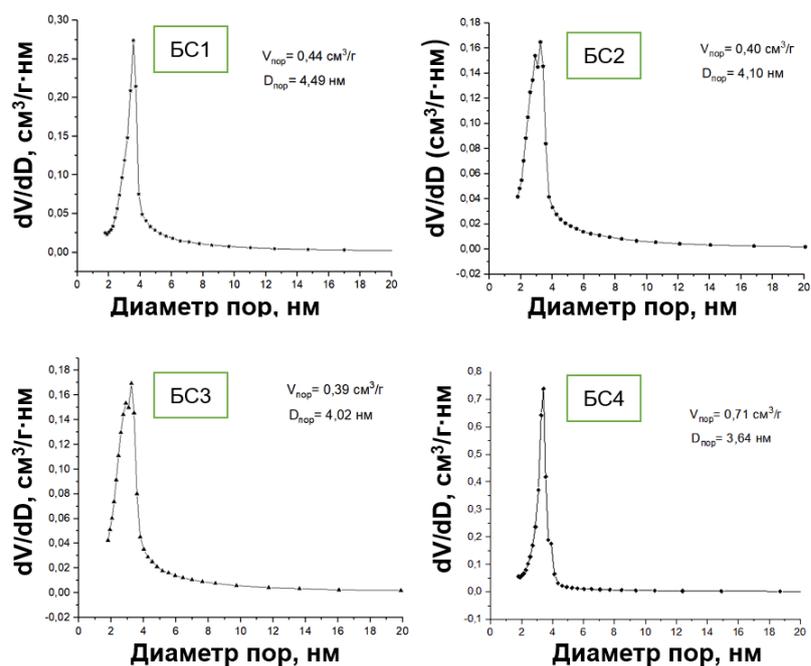


Рис.5. Дифференциальные кривые распределения мезопор по размерам (BJH) для образцов БС

Fig. 5. Differential mesopore size distribution curves (BJH) for BG samples

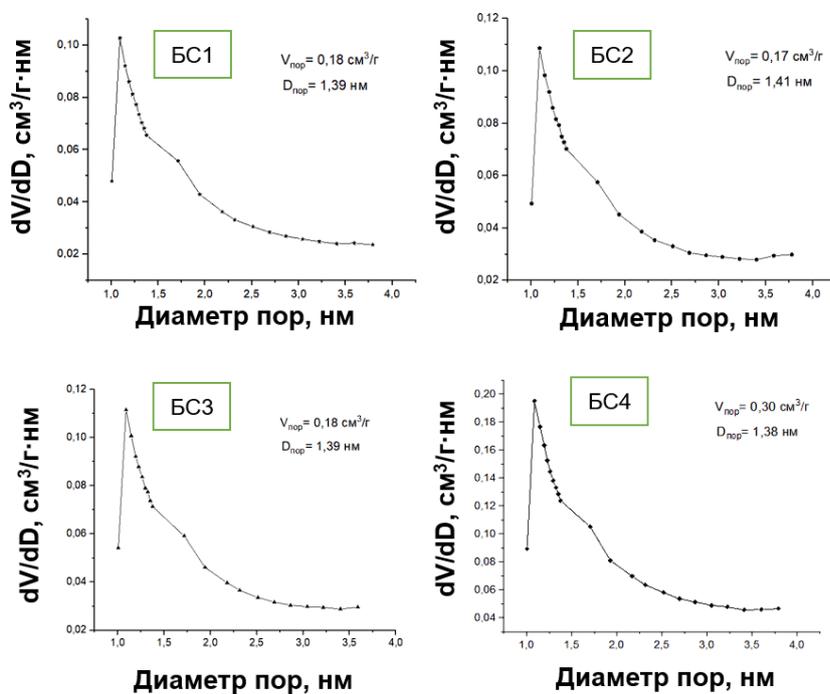


Рис.6. Дифференциальные кривые распределения микропор по размерам (HK) для образцов БС

Fig. 6. Differential curves of micropore size distribution (HK) for BG samples

В целом, по мере увеличения времени синтеза (БС1 → БС3) наблюдается тенденция к незначительному снижению среднего диаметра пор и увеличению площади поверхности, что отражает постепенное формирование более развитой мезопористой структуры. Объем пор изменяется незначительно, оставаясь в диапазоне 0,39–0,44 см<sup>3</sup>/г, за исключением БС4, где он достигает 0,71 см<sup>3</sup>/г. Это подтверждает, что условия длительного созревания в растворе способствуют образованию наиболее развитой пористой структуры.

Дифференциальные кривые распределения пор (рисунки 5, 6) показывают, что во всех образцах БС сохраняется чётко выраженное модальное распределение как мезопор, так и микропор. Для мезопористой области (ВН) максимум располагается в узком интервале 3,6–4,5 нм; с увеличением времени синтеза наблюдается лёгкое смещение модального диаметра к меньшим значениям — от 4,49 нм у БС1 до 3,64 нм у БС4 — одновременно с увеличением суммарного объёма пор до 0,71 см<sup>3</sup>/г и резким ростом удельной поверхности. В микропористом диапазоне (НК) картина аналогична: максимум остаётся неизменным (≈1,38–1,41 нм), тогда как объём микропор постепенно возрастает от 0,16–0,18 см<sup>3</sup>/г для БС1–БС3 до 0,30 см<sup>3</sup>/г для БС4. Такое поведение свидетельствует о сохранении однородной кремнезёмной матрицы при одновременном развитии текстуры: длительное созревание золя приводит к более плотной упаковке стенок каналов, формированию дополнительных микропор и общему увеличению пористости без нарушения модальной природы распределений. В итоге варьирование времени синтеза позволяет направленно регулировать размеры и объёмы пор, обеспечивая наиболее развитую и однородную мезо- и микропористую структуру в образце БС4, что делает его особенно перспективным для задач контролируемой доставки ионов и биомолекул. Таким образом, можно сделать вывод о высокой эффективности применённого золь-гель метода и возможности управления поверхностными характеристиками БС ( $S_{уд}$ , и объёма и диаметра пор) путём варьирования времени синтеза.

Для дальнейшей модификации аминокислотой выбран образец БС4 с наибольшей площадью поверхности.

На ИК спектре образца БС4 пропитанного глицином (рис. 7), присутствуют полосы соот-

ветствующие связи Si-O-Si в трех полосах поглощения при 1101,77 см<sup>-1</sup>, 806,01 см<sup>-1</sup> и 512,85 см<sup>-1</sup>. Колебание, наблюдаемое в полосе поглощения при 512,85 см<sup>-1</sup>, приписывается осциляторным колебаниям этой связи, в то время как полосы поглощения при 806,01 см<sup>-1</sup> и 1101,77 см<sup>-1</sup> соответствуют деформационным и валентным колебаниям связи  $\nu$ Si-O-Si соответственно [15]. Наличие этих полос подтверждает, что тетраэдрические блоки SiO<sub>4</sub> образовались для установления стекляннной сетки БС [16]. Помимо выраженной полосы карбонильных колебаний  $\nu$  C=O, в интервале 1500–1700 см<sup>-1</sup> появляется 3 полосы, которые могут быть отнесены к колебаниям связей N-H, характерным для глицина.

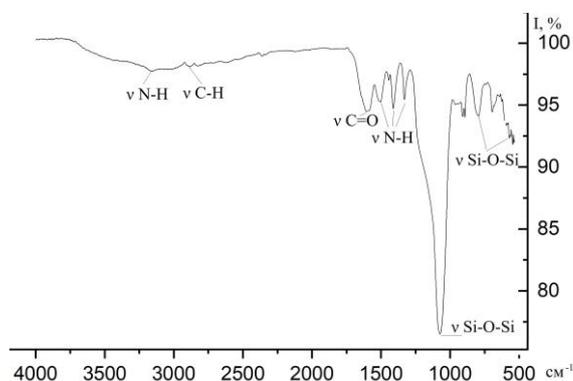
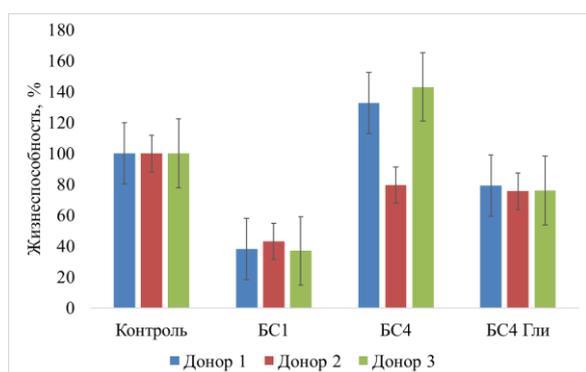


Рис.7. ИК спектр образца БС4 модифицированного глицином

Fig. 7. IR spectrum of BG4 sample modified with glycine

Исследование жизнеспособности макрофагов (рис. 8) в присутствии материалов показало, что в присутствии образца БС1 выживает только около ~40 % клеток относительно контрольного образца (клетки, инкубированные в среде без материала), в то время как для образца БС4 значения составляют от 80 до 140 % для разных доноров. Образец БС4 модифицированный глицином имеет значение жизнеспособности 75–80 %, вероятно такое снижение относительно чистого биостекла возможно за счёт увеличения кислотности среды, т.к. глицин может частично растворяться с поверхности частиц.



**Рис.8.** Жизнеспособность макрофагов в присутствии образцов биостекла

**Fig. 8.** Viability of macrophages in the presence of bioglass samples

### Заключение

Золь-гель методом синтезированы частицы сферического мезопористого биоактивного стекла системы  $SiO_2$ -CaO. Изменение времени синтеза позволило управлять морфологией и структурой частиц, с увеличением времени синтеза средний размер частиц возрастает от 194 до 301 нм. Сканирующая электронная микроскопия подтвердила формирование частиц преимущественно сферической формы. Рентгенофазовый анализ показал, что все полученные образцы находятся в аморфном состоянии силикатного стекла, что подтверждается широким пиком  $2\theta$  около  $23^\circ$ . Все образцы характеризуются изотермами типа IVa с выраженным гистерезисом по номенклатуре IUPAC, что указывает на мезопористую структуру. Наибольшая  $S_{уд}$  (БЭТ) составила  $659,45 \text{ м}^2/\text{г}$  для образца BS4; основной вклад в пористость вносят мезопоры диаметром 3,5 нм и объемом  $0,3 \text{ см}^3/\text{г}$ . Модифицирование биостекла глицином снижает жизнеспособность макрофагов в присутствии материалов, но при этом жизнеспособность остается на довольно высоком уровне 75-80 %. Такой уровень жизнеспособности клеток в присутствии материалов является достаточным для использования полученных материалов в качестве биосовместимых.

### Список литературы

1. Глобальное бремя болезней (Global burden of disease): порождение доказательств, направление политики. Региональное издание для Европы и Центральной Азии. – США : Ин-

ститут по измерению здоровья и оценки состояния здоровья университета Вашингтон, Сеть человеческого развития Всемирного банка, 2013. – 70 с.

2. Современные методы диагностики, профилактики и лечения остеопороза: метод. пособие / сост.: Л. Б. Дрыгина, И.В. Трофимова, О.А. Саблин, И.Д. Никифорова – СПб: ВЦЭРМ им. А.М. Никифорова МЧС России, 2011. – 86 с.

3. Шумилова А. А. Материалы для восстановления костной ткани / А. А. Шумилова, Е. И. Шишацкая // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. – 2014. – Т. 7, – № 2. – С. 209–221.

4. Баринов С.М. Биокерамика на основе фосфатов кальция / С. М. Баринов, В. С. Комлев - М.: Наука, 2005. – 189 с.

5. Севастьянов В. И. Биосовместимые материалы / Под ред. В.И. Севастьянова, М.П. Пичникова. – М.: МИА, 2011. – 544с.: ил.

6. Патент № 2617050 Российская Федерация, МПК А61L 27/02, А61L 27/12, А61L 27/24. Биоактивный композиционный материал для замещения костных дефектов и способ его получения : № 2016113715 : заявл. 11.04.2016 : опубл. 19.04.2017 / Гузеев В. В., Гузеева Т. И., Зеличенко Е. А., Гурова О. А., Нестеренко А. А. – 11 с.

7. Hench L. L., Jones J. R. Bioactive glasses: frontiers and challenges // *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. – 2015. – Т. 3. – С. 194.

8. Голованова О. А. Адсорбция аминокислот на поверхности брусита и гидроксилатапата / Голованова О. А., Головченко К. К. // *Журнал физической химии*. – 2019. – Т. 93. – №. 11. – С. 1714–1723.

9. Tavafoghi M. The role of amino acids in hydroxyapatite mineralization / M. Tavafoghi, M. Cerruti // *Journal of The Royal Society Interface*. – 2016. – Vol. 13, №123. – P. 1–11.

10. Amino acid surface modified bioglass: A candidate biomaterial for bone tissue engineering / Y. Özkabadayı, M. Türk, A. Kumandaş, S. Karahan // *Microscopy Research and Technique*. – 2025. – Vol. 88, № 1. – P. 26–41.

11. Interaction of some essential amino acids with synthesized poorly crystalline hydroxyapatite

/ A. El Rhilassi, M. Mourabet, M. Bennani-Ziatni [et al.] // Journal of Saudi Chemical Society. – 2016. – Vol. 20, is. 1. – P. 632–640.

12. Al-Nasiry S. The use of Alamar Blue assay for quantitative analysis of viability, migration and invasion of choriocarcinoma cells. / S. Al-Nasiry, N. Geusens, M. Hanssens, C. Luyten, R. Pijnenborg // Human Reproduction. – 2007. – Vol. 22. – P. 1304–1309.

13. Rampersad S. N. Multiple Applications of Alamar Blue as an Indicator of Metabolic Function and Cellular Health in Cell Viability Bioassays / S. N. Rampersad // Sensors. – 2012. – Vol. 12, – № 9. – P. 12347–12360.

14. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, K. Kaneko, A. V. Neimark // Pure and applied chemistry. – 2015. – Vol. 87, № 9 – P. 1051–1069.

15. Z. Neščáková, K. Zheng, L. Liverani, Q. Nawaz, D. Galusková, H. Kaňková, M. Michálek, D. Galusek, A.R. Boccaccini, Multifunctional zinc ion doped sol-gel derived mesoporous bioactive glass nanoparticles for biomedical applications // Bioact. Mater. – 2019. – V.4. – p. 312–321

16. D. Arcos, N. Gómez-Cerezo, M. Saiz-Pardo, D. de Pablo, L. Ortega, S. Enciso, B. Fernández-Tomé, I. Díaz-Güemes, F.M. Sánchez-Margallo, L. Casarrubios, M.J. Feito, M.T. Portolés, M. Vallet-Regí, Injectable mesoporous bioactive nanoparticles regenerate bone tissue under osteoporosis conditions // Acta Biomater. – 2022. – V.151. – p. 501–511.

### Информация об авторах

*И. А. Курзина – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой природных соединений, фармацевтической и медицинской химии НИИ ТГУ.*

*Ш. Машайехан – Ph.D., доцент кафедры химического и нефтяного машиностроения Технологического университета имени Шарифа.*

*Д. Н. Лыткина – кандидат технических наук, доцент кафедры природных соединений, фармацевтической и медицинской химии НИИ ТГУ.*

*Р. Т. Садыков – аспирант кафедры высокомолекулярных соединений, младший научный сотрудник НИИ ТГУ.*

*А. Б. Зубовская – студент химического факультета НИИ ТГУ.*

### References

1. Global burden of disease: generating evidence, directing policy. Regional publication for Europe and Central Asia. – USA: Institute for Health Metrics and Evaluation, University of Washington, World Bank Human Development Network, 2013. – 70 p.

2. Modern methods of diagnostics, prevention and treatment of osteoporosis: method. manual / compiled by: L. B. Drygina, I. V. Trofimova, O. A. Sablin, I. D. Nikiforova – St. Petersburg: A. M. Nikiforov All-Russian Center for Epidemiological Research, Ministry of Emergency Situations of Russia, 2011. – 86 p.

3. Shumilova A. A. Materials for bone tissue restoration / A. A. Shumilova, E. I. Shishatskaya // Journal of the Siberian Federal University. Biology. – 2014. – T. 7, – No. 2. – P. 209–221.

4. Barinov S.M. Bioceramics based on calcium phosphates / S. M. Barinov, V. S. Komlev – M.: Nauka, 2005. – 189 p.

5. Sevastyanov V.I. Biocompatible materials / Ed. V.I. Sevastyanova, M.P. Pichnikova. – M.: MIA, 2011. – 544 p.: ill.

6. Patent No. 2617050 Russian Federation, IPC A61L 27/02, A61L 27/12, A61L 27/24. Bioactive composite material for replacing bone defects and the method for producing it: No. 2016113715: declared 11.04.2016: published 19.04.2017 / Guzeev V. V., Guzeeva T. I., Zelichenko E. A., Gurova O. A., Nesterenko A. A. – 11 p.

7. Hench L. L., Jones J. R. Bioactive glasses: frontiers and challenges // Frontiers in bioengineering and biotechnology. – 2015. – Vol. 3. – P. 194.

8. Golovanova O. A. Adsorption of amino acids on the surface of brushite and hydroxyapatite / Golovanova O. A., Golovchenko K. K. // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2019. – Vol. 93. – No. 11. – pp. 1714–1723.

9. Tavafoghi M. The role of amino acids in hydroxyapatite mineralization / M. Tavafoghi, M.

Cerruti // Journal of The Royal Society Interface. – 2016. – Vol. 13, No. 123. – P. 1–11.

10. Amino acid surface modified bioglass: A candidate biomaterial for bone tissue engineering / Y. Özkabadayı, M. Türk, A. Kumandaş, S. Karahan // Microscopy Research and Technique. – 2025. – Vol. 88, No. 1. – P. 26–41.

11. Interaction of some essential amino acids with poorly synthesized crystalline hydroxyapatite / A. El Rhilassi, M. Mourabet, M. Bennani-Ziatni [et al.] // Journal of Saudi Chemical Society. – 2016. – Vol. 20, is. 1. – P. 632–640.

12. Al-Nasiry S. The use of Alamar Blue assay for quantitative analysis of viability, migration and invasion of choriocarcinoma cells. / S. Al-Nasiry, N. Geusens, M. Hanssens, C. Luyten, R. Pijnenborg // Human Reproduction. – 2007. – Vol. 22. – P. 1304–1309.

13. Rampersad S. N. Multiple Applications of Alamar Blue as an Indicator of Metabolic Function and Cellular Health in Cell Viability Bioassays / S. N. Rampersad // Sensors. – 2012. – Vol. 12, – No. 9. – P. 12347–12360.

14. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes, K. Kaneko, A. V. Neimark // Pure and applied chemistry. – 2015. – Vol. 87, No. 9 – P. 1051–1069.

15. Z. Neščáková, K. Zheng, L. Liverani, Q. Nawaz, D. Galusková, H. Kaňková, M. Michálek, D. Galusek, A.R. Boccaccini, Multifunctional zinc ion doped sol–gel derived mesoporous bioactive glass nanoparticles for biomedical applications // Bioact. Mater. – 2019. – V.4. – p. 312–321

16. D. Arcos, N. Gómez-Cerezo, M. Saiz-Pardo, D. de Pablo, L. Ortega, S. Enciso, B. Fernández-Tomé, I. Díaz-Güemes, F.M. Sánchez-Margallo, L. Casarrubios, M.J. Feito, M.T. Portolés, M. Vallet-Regí, Injectable mesoporous bioactive nanoparticles regenerate bone tissue under osteoporosis conditions // Acta Biomater. – 2022. – V.151. – p. 501–511.

#### **Information about the authors**

*I. A. Kurzina – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Natural Compounds, Pharmaceutical and Medical Chemistry at TSU.*

*Sh. Mashayekhan – Ph.D., Associate Professor of the Department of Chemical and Petroleum Engineering at Sharif Technological University.*

*D. N. Lytkina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Compounds, Pharmaceutical and Medical Chemistry at TSU.*

*R. T. Sadykov – Postgraduate Student of the Department of Macromolecular Compounds, Junior Researcher at TSU.*

*A. B. Zubovskaya – Student of the Chemistry Faculty at TSU.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 05.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 05 Aug. 2025; approved after reviewing 25 Aug. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.