



## Материалы с новыми функциональными свойствами

УДК 661.846:546.05:66.046

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29004

**Синтез мезопористых фосфатов магния с высокой удельной площадью поверхности методом термической дегазации струвита***Е. О. Гладких<sup>1</sup>✉, И. А. Пермякова<sup>1</sup>, Ю. В. Кузнецова<sup>1</sup>, Г. В. Леонтьева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: [eogladkikh@pstu.ru](mailto:eogladkikh@pstu.ru)

Поступила в редакцию: 17.10. 2025 г.; после доработки: 07.11.2025 г.; принята в печать: 08.11.2025 г.

**Аннотация** – Фосфаты магния представляют большой интерес как основной компонент osteoconductive материалов, подвергающихся в организме резорбции и обладающих свойством ангиогенеза, и при этом желаемым свойством таких материалов является высокая удельная площадь поверхности. Представлены результаты исследования процесса получения мезопористого фосфата магния из струвита бесшаблонным методом при различных условиях. Поверхностные свойства мезопористых продуктов исследованы методом БЭТ, определены размер и объемы пор. Показано влияние температуры, времени термической обработки и метода получения струвита на характеристики получаемого продукта. Состав и структура продукта с наилучшими свойствами исследована с применением рентгенофазового анализа и капиллярного электрофореза. Метод получения струвита как материала-предшественника оказывает значительное влияние на возможность получения продукта с развитой поверхностью.

*Ключевые слова:* струвит, фосфат магния, термическая дегазация, мезопористый материал.

## Materials with new functional properties

UDC 661.846:546.05:66.046

DOI: 10.25514/CHS.2025.2.29004

**Synthesis of Mesoporous Magnesium Phosphates with High Specific Surface Area by Thermal Degassing of Struvite***Evgeniya O. Gladkikh<sup>1</sup>✉, Irina A. Permyakova<sup>1</sup>, Yuliya V. Kuznetsova<sup>1</sup>, and Galina V. Leont'eva<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia  
e-mail: [eogladkikh@pstu.ru](mailto:eogladkikh@pstu.ru)

Received: October 17, 2025; Revised: November 7, 2025; Accepted: November 8, 2025

**Abstract** – Magnesium phosphates are of great interest as the main component of osteoconductive materials that undergo resorption in the human body and exhibit angiogenesis properties. A high specific surface area is a desirable property of such materials. The paper presents the results of a

study on the production of mesoporous magnesium phosphate from struvite using a template-free method under various conditions. The surface properties of mesoporous products were studied using the BET method, and the pore sizes and volumes were determined. The influence of temperature, heat treatment time, and the struvite production method on the characteristics of the resulting product is shown. The composition and structure of the product with the best properties were studied using X-ray phase analysis and capillary electrophoresis. The study concludes that the method of obtaining struvite as a precursor material significantly influences the feasibility of obtaining a product with a developed surface area.

*Keywords:* struvite, magnesium phosphate, thermal degassing, mesoporous material.

## ВВЕДЕНИЕ

Магний, наряду с натрием, калием и кальцием, является одним из самых распространенных металлов в организме человека, и порядка шестидесяти процентов магния содержится в кортикальной части кости. При этом магний выполняет такие важные функции, как усиление активности остеокластов и остеобластов, стимуляция роста и пролиферации клеток и стабилизация ДНК [1].

На данный момент фосфаты магния рассматриваются как альтернатива фосфатам кальция при создании различных osteoconductive материалов. Известен опыт успешного применения различных соединений кальция и фосфора для регенерации костной ткани. Однако даже те соединения кальция, которые обладают относительно высокой скоростью резорбции, в ряде случаев в организме претерпевают трансформацию в малорастворимые фазы, что является существенным недостатком [2]. Известно, что ионы кальция, образующиеся при резорбции, практически не участвуют напрямую в формировании новой костной ткани [3, 4], поэтому внимание ученых все больше привлекают соединения магния. При создании материалов важно учитывать такие свойства как биосовместимость, нетоксичность, развитая поверхность, пористость и способность к резорбции.

С этой точки зрения фосфаты магния являются перспективными для получения osteoconductive материалов, так как соответствуют перечисленным выше требованиям. При этом растворимость фосфатов магния в целом значительно выше растворимости фосфатов кальция [5]. Кроме этого, соединения магния также обладают ангиогенной активностью, что имеет большое значение для материалов, применяющихся в процессе регенерации костной ткани [6].

Фосфаты магния применяют для получения керамических osteoconductive материалов [7, 8], костных цементов [9–11], гранул [12] и покрытий [13]. Кроме этого, высокая скорость резорбции делает фосфаты магния перспективными для получения материалов с контролируемым высвобождением лекарственных средств и антибактериальных агентов [14–17].

При получении частиц фосфата магния с добавками для улучшения лечения костных дефектов важны площадь поверхности и сорбционная емкость основного компонента. В связи с этим, особое внимание уделяется использованию мезопористых фосфатов магния.

Создание развитой поверхности может осуществляться различными методами – известен опыт применения золь-гель процесса [18], 3D-принтинга [19]. Для создания мезопористой структуры предлагаются также шаблонные методы [20], однако наличие кристаллизационной воды в составе соединений магния и фосфора и возможность ее удаления при термической обработке позволяют рассматривать так же бесшаблонный метод получения мезопористой структуры. Так, термическая обработка гексагидрата фосфата магния-аммония (струвита,  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ ) приводит к получению материала с высокой площадью поверхности и наноразмерными порами за счет удаления из состава материала аммиака и воды, и при этом данный метод не предполагает применения дополнительных реагентов, в отличие от шаблонных [21]. Кроме того, в ряде случаев шаблонный метод не применим для создания мезопористой структуры материалов, обладающих высокой реакционной способностью, так как на этапе формирования структуры происходит взаимодействие сурфактанта с материалом, вследствие чего образуется продукт низкого качества с неоднородным размером пор [22], что актуально и для неорганических фосфатов.

В качестве материала-предшественника в настоящее время рассматривают кристаллогидраты, способные к отдаче газообразных продуктов в ходе термической обработки. Примером такого предшественника является шестиводный фосфат магния-аммония (струвит). Способ приготовления материала предшественника и его свойства, такие как исходная удельная площадь поверхности и размер частиц, могут существенно повлиять на скорость отдачи газообразных компонентов и, как следствие, на размер пор и развитие достаточно высокой площади поверхности у продукта термической обработки, что наиболее актуально для последующего использования таких материалов для остеокондукции.

Взаимосвязь способа приготовления материала-предшественника, его исходных свойств, условий термической обработки со свойствами конечных продуктов на текущий момент мало изучена и стала предметом настоящей работы.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Получение струвита*

Струвит как материал-предшественник мезопористого фосфата получали с применением традиционной и авторских методик.

При применении традиционной методики смешивали 0,1 М раствор  $MgCl_2$  и 0,1М раствор  $(NH_4)_2HPO_4$  равных объемов, добавляли раствор  $NH_4OH$  до достижения рН осаждения 9,5 при перемешивании. В описании экспериментальных данных обозначен как St-trad.

По модифицированной (авторской) методике струвит осаждали в две стадии с получением промежуточного продукта получения струвита – фосфата магния – с последующим добавлением его к раствору, содержащему катионы

аммония и фосфат-анионы [23]. В описании экспериментальных данных обозначен как St-mod.

По альтернативной авторской методике [21] струвит получали смешением растворов  $MgCl_2$  и  $(NH_4)_2HPO_4$  с выдерживанием суспензии осадка при длительном перемешивании без повышения pH за счет добавления в систему раствора основания.

Полученные осадки отфильтровывали через фильтр «Синяя лента», промывали дистиллированной водой, затем сушили фильтр с осадком на воздухе.

### ***Получение мезопористого фосфата магния из струвита***

Для осуществления процесса термической дегазации навески воздушно-сухого материала-предшественника переносили в бюкс и выдерживали в сушильном шкафу, периодически взвешивая на аналитических весах Excellence Plus XP204S (MettlerToledo, погрешность 0,2 мг) для регистрации потери массы. По завершении процесса образцы охлаждали до комнатной температуры в эксикаторе.

### ***Исследование состава и свойств мезопористого продукта***

Для исследования образцов с помощью оптической микроскопии на предметное стекло наносили каплю дистиллированной воды, в капле воды суспендировали небольшое количество твердого материала. Исследование структуры кристаллов осуществляли с помощью оптического микроскопа Микромед Полар-1. С помощью встроенной системы визуализации фиксировали изображения кристаллов, которые затем обрабатывали с применением программного обеспечения SIAMS800.

Определение удельной площади поверхности получаемых пористых материалов проводили по методу БЭТ. Использовали быстродействующий анализатор сорбции газов Quantachrome NOVA 1200, изотермы адсорбции получали при температуре жидкого азота. Для навесок использовали прецизионные весы Excellence Plus XP204S (MettlerToledo), погрешность 0,2 мг.

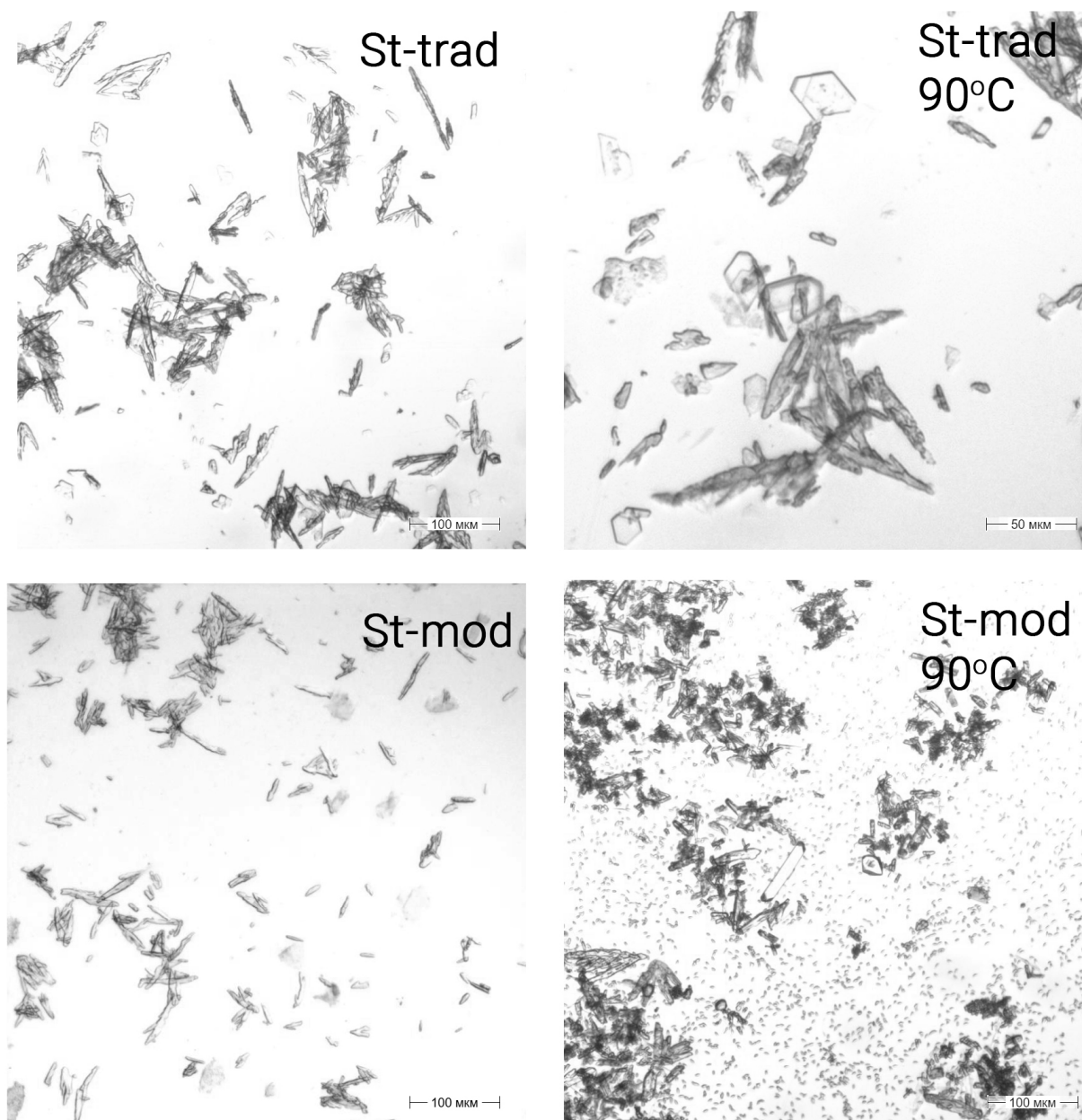
Состав струвита и продуктов его термической обработки исследовали с помощью Фурье-ИК-спектроскопии. Использовали Фурье-спектрометр Nicolet 380 (Thermo Scientific), образцы таблетировали с KBr. Для навесок использовали прецизионные весы Excellence Plus XP204S (MettlerToledo), погрешность 0,2 мг.

Идентификацию фазового состава твердых образцов кристаллогидратов осуществляли с помощью рентгенофазового анализа (РФА), который выполняли на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu) с программным обеспечением XRD 6000/7000 Ver.5.21 и базой данных JCPDSPDFI. Рентгеновская трубка – Cu, скорость сканирования  $0,5 \text{ град} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

Анализ содержания  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$  в твердых образцах и фильтраатах проводили с помощью метода капиллярного электрофореза с использованием системы Капель-205 (ООО «Люмэкс-маркетинг»). Навески твердых образцов предварительно растворяли в HCl. Для калибровки использовали стандартные образцы ГСО на ионы  $Mg^{2+}$ ,  $NH_4^+$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $H^+$ ,  $Cl^-$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Термическая обработка образцов струвита приводит к существенным преобразованиям состава, структуры и морфологии кристаллов исследуемых образцов. На рисунке 1 приведены микрофотографии образцов струвитов, полученных различными методами, и продукты их термической обработки.



**Рис. 1.** Образцы струвита St-trad и St-mod до термической обработки (слева) и после термической обработки (справа) при 90 °С в течение 2 часов 40 минут.

**Fig. 1.** Samples of struvite St-trad and St-mod before thermal processing (left) and after thermal processing (right) at 90 °C for 2 hours 40 minutes.

Струвит St-mod обладает средним размером кристаллов менее 60 мкм, в то время как кристаллы струвита St-trad более крупные. После термической обработки струвита St-mod в материале наблюдается присутствие значительно более мелких частиц. В продуктах термической обработки струвита St-trad

наблюдаются кристаллы ромбовидной формы, присутствия которых в исходных образцах обнаружено не было, что может говорить о появлении новых фаз в ходе обработки.

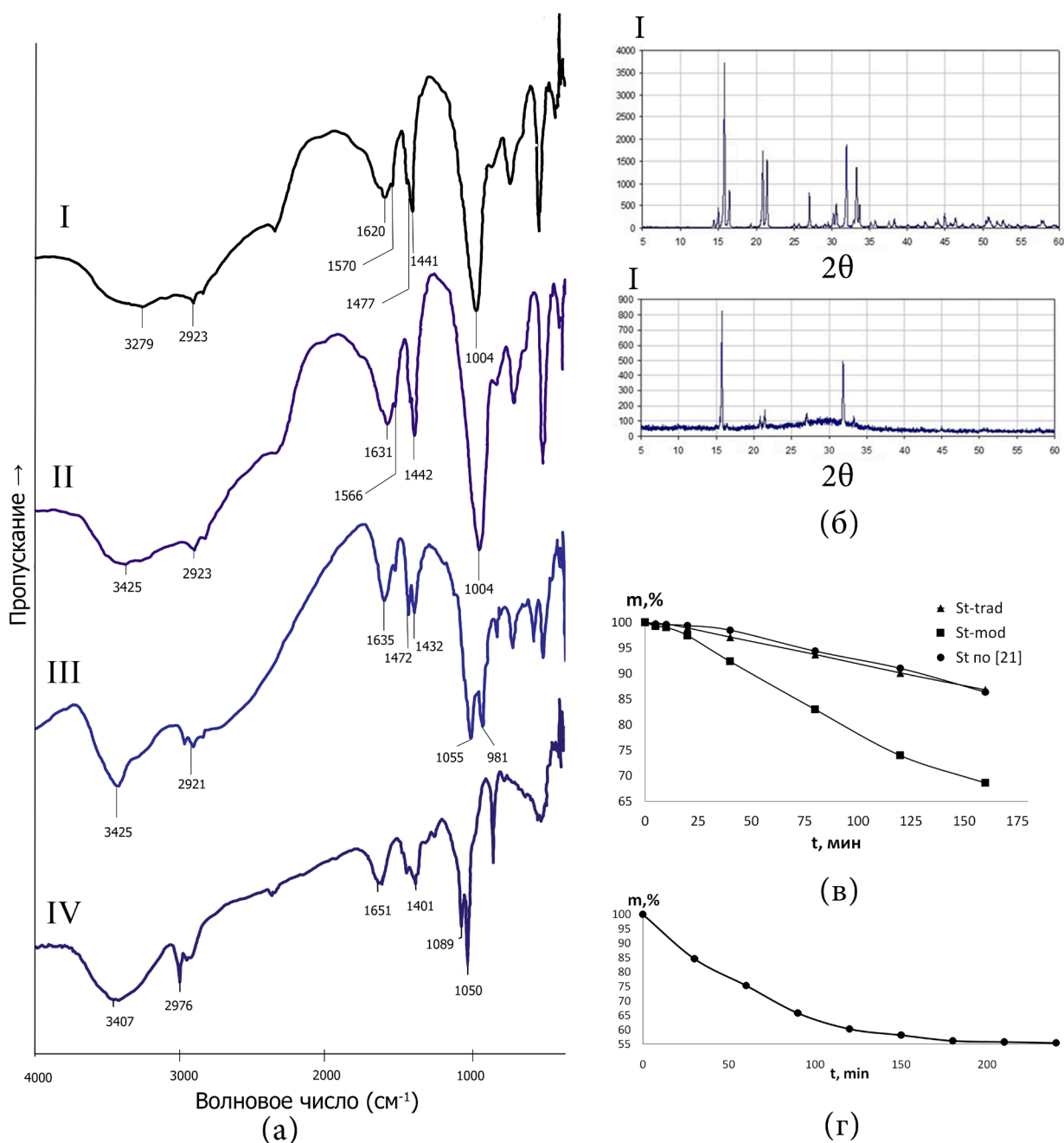
Термическое преобразование струвита позволяет сократить количество кристаллизационной воды и аммиака в его составе. На ИК-спектрах образцов струвита, полученных по модифицированной методике при температуре 50°C (рис. 2а–II), наблюдается незначительное изменение интенсивности полос поглощения.

Термическая обработка образцов струвита при 70°C и 90°C приводит к более существенным изменениям. В результате обработки наблюдаются снижение интенсивности полосы поглощения при 1441–1477 см<sup>-1</sup>, соответствующей ионам аммония в составе струвита. Появляется характерное расщепление в области 1100–1000 см<sup>-1</sup>, типичное для таких соединений магния и фосфора, как моногидрат фосфата магния-аммония (диттмарит) [24] и тригидрат гидрофосфата магния (ньюбериит) [25]. Также существенно меняется характер полос при в области 2923–3407 см<sup>-1</sup>, характеризующих ОН-группы в составе кристаллизационной воды струвита.

Значения потери массы струвита, полученного с применением различных методик при температуре 90°C, приведены на рис. 2в. Образец струвита St-mod продемонстрировал значительно более высокую потерю массы, чем образцы, полученные по другим методикам. Скорости потери массы образцов струвита, полученных при применении традиционной и авторской [21] методик синтеза в 2 раза ниже, чем для St-mod. В диапазоне 40–160 минут термической обработки скорость потери массы практически линейна для всех исследованных образцов струвита, при этом скорости потери массы для струвитов St-trad и St по методике [21] составляют 0,08–0,09 %масс/мин, в то время как скорость потери массы струвита St-mod – 0,23 %масс/мин.

Также была исследована потеря массы струвита, полученного по модифицированной методике, при более длительной обработке при 90 °С. Было показано, что материал-предшественник может потерять порядка 45% первоначальной массы в течение 4 часов (рис. 2г).

Результаты рентгенофазового анализа продукта, полученного при термической обработке струвита St-mod, показали, что при обработке происходит преобразование кристаллической структуры струвита в аморфную (рис. 2б). Присутствие на рентгенограмме рефлексов, соответствующих структуре струвита, может быть связано с неполным удалением кристаллизационной воды и аммиака из твердой фазы при выбранных условиях.



**Рис. 2.** Результаты термической обработки струвита: (а) ИК-спектры образцов: I –исходный струвит St-mod, и продуктов термической обработки II – при 50°С, III – при 70°С, IV – при 90°С, (б) рентгенограмма исходного струвита St-mod и продукта термической обработки при 90°С в течение 4 часов, (в) зависимость потери массы, m, %, от времени t, мин, при 90°С для образцов струвитов, (г) зависимость потери массы, m, %, от времени при 90°С для струвита St-mod в течение 4 часов.

**Fig. 2.** Results of thermal processing of struvite: (a) IR spectra of samples: I – initial struvite St-mod, and products of thermal processing, II – at 50 °C, III – at 70 °C, IV – at 90 °C, (б) X-ray diffraction pattern of the initial struvite St-mod and the product of thermal processing at 90 °C for 4 hours, (в) dependence of mass loss, m, %, on time t, min, at 90 °C for struvite samples, (г) dependence of mass loss, m, %, on time at 90 °C for struvite St-mod for 4 hours.

В таблице 1 приведены результаты термической обработки материалов-предшественников на основе струвитов, полученных по традиционной и модифицированной методикам.

**Таблица 1.** Результаты термической обработки материалов-предшественников при температуре 90°C

**Table 1.** Results of thermal processing of precursor materials at a temperature of 90°C

Материал-предшественник	$\Delta m$ , %	Средний радиус пор, нм	Общий объем пор, $\text{см}^3 \text{г}^{-1}$	Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2 \text{г}^{-1}$ после обработки	Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2 \text{г}^{-1}$ до обработки
St-trad	13,2	3,95	0,089	45	1,5
St-mod	44,6	2,6	0,343	266	3,0

Удельные площади поверхности образцов струвитов до обработки отличаются незначительно и согласуются с аналогичными данными, известными в литературе [21]. После термической обработки параметры поверхности образцов существенно меняются, при этом для образца St-mod достигается высокая удельная площадь поверхности до  $266 \text{ м}^2 \text{г}^{-1}$ , что является одной из важнейших характеристик для получения остеокондуктивных материалов.

Указанные явления более быстрого преобразования образцов струвита и формирование высокой удельной площади поверхности могут быть связаны с особенностями свойств струвита, полученного по модифицированной методике: размер кристаллов, площадь поверхности, степень неоднородности поверхности, что могло стать причиной повышения интенсивности процесса отдачи газообразных компонентов и формирования развитой поверхности. Процесс получения струвита St-mod связан с созданием неравновесных условий и высокой скоростью осаждения. Струвит, как продукт, полученный в таких условиях, может обладать большей метастабильностью по сравнению со струвитом, полученным по традиционной методике и, как следствие, более высокими скоростями преобразования при термической обработке.

Состав мезопористого продукта, полученного при термической обработке струвита St-mod при 90°C в течение 4 часов, был исследован после полного растворения с применением капиллярного электрофореза (табл. 2). Дополнительно анализировали состав продукта термической обработки струвита St-mod, приготовленного в тех же условиях в течение 6 часов.

**Таблица 2.** Состав мезопористых фосфатов, полученных при термической обработке струвита St-mod

**Table 2.** Composition of mesoporous phosphates obtained by thermal processing of struvite St-mod

Время обработки	Мольное отношение $\text{Mg}^{2+} : \text{NH}_4^+ : \text{PO}_4^{3-} : \text{H}_2\text{O}$
4 часа	1:0,51:0,91:2,48
6 часов	1:0,48:1,01:2,25

Известно, что для исходного струвита отношение  $Mg^{2+}: NH_4^+: PO_4^{3-}: H_2O = 1:1:1:6$ . В результате термической обработки материал-предшественник утратил до 52,0% аммиака из состава твердой фазы и до 62,5% кристаллизационной воды, а состав образцов приблизился по стехиометрическому соотношению, соответствующему фазам ньюбериита ( $MgHPO_4 \cdot 3H_2O$ ) или диттмарита ( $MgNH_4PO_4 \cdot H_2O$ ), что дополнительно подтверждает данные ИК-спектроскопии. Возможность образования данных фаз при термической обработке фосфатов магния согласуется с литературными данными [24].

Кинетические закономерности высвобождения газообразных компонентов материала-предшественника являются одним из ключевых факторов для разработки технологии получения мезопористых материалов для остеокондукции. Способ организации технологического процесса, метод и аппарат для температурной обработки, а также толщина слоя насыпного материала существенным образом могут повлиять на ход дегазации, что может создать трудности для масштабирования. Поэтому дальнейшая работа будет направлена на детальное изучение кинетики дегазации изучаемых материалов с рекомендациями по организации технологического процесса данного этапа технологии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования было показано, что струвит, синтезированный с применением различных методик, может быть применен для получения материалов с высокой удельной площадью поверхности до  $266 \text{ м}^2 \text{ г}^{-1}$ . Все полученные продукты являются мезопористыми, условия термической обработки и метод получения материала-предшественника оказывают существенное влияние на свойства получаемого продукта.

Было показано, что термическая обработка струвита, синтезированного по традиционной и модифицированной методикам, позволяет увеличить удельную площадь поверхности материала в 30 и 89 раз соответственно, в то время как различие в удельной площади поверхности материалов-предшественников невелико. Данные ИК-спектроскопии, рентгенофазового анализа, а также определение химического состава получаемого после термической обработки продукта показывают образование аморфных фаз, близких по составу тригидрату гидрофосфата магния (ньюбериит) и моногидрату фосфата магния-аммония (диттмарит). Результаты работы могут быть полезны для последующей разработки технологии получения мезопористых материалов для остеокондукции.

*Исследование выполнено в рамках реализации Программы развития университета на 2025–2036 гг. при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», соглашение № 075-15-2025-216 от 04.04.2025 г.*

## ACKNOWLEDGEMENT

The research was carried out within the University Development Program for 2025–2036 with the support of the Strategic Academic Leadership Program “Priority 2030”, Agreement No. 075-15-2025-216 dated 04.04.2025.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

## Список литературы:

1. Devi, B., Lalzawmliana, V., Maktumkari, S., Kumar, V., Roy, M., & Nandi, S. (2022). Magnesium phosphate bioceramics for bone tissue engineering. *The Chem. Rec.*, 22(11), e202200136. <https://doi.org/10.1002/tcr.202200136>.
2. Kaiser, F., Schröter, L., Stein, S., Krüger, B., Weichhold, J., Stahlhut, P., Ignatius, A., & Gbureck, U. (2022). Accelerated bone regeneration through rational design of magnesium phosphate cements, *Acta Biomaterialia*, 145, 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.04.019>.
3. Den Hollander, W., Patka, P., Klein, C.P., & Heidendal, G.A. (1991) Macroporous calcium phosphate ceramics for bone substitution: a tracer study on biodegradation with <sup>45</sup>Ca tracer. *Biomaterials*, 12(6), 569–573. [https://doi.org/10.1016/0142-9612\(91\)90053-D](https://doi.org/10.1016/0142-9612(91)90053-D).
4. Metsger, D.S., Dephiliip, R.M., & Hayes, T.G. (1993). An autoradiographic study of calcium phosphate ceramic bone implants in turkeys. *Clin Orthopaedic and Rel Res*, 291, 283–294. <https://doi.org/10.1097/00003086-199306000-00033>.
5. Schröter, L., Kaiser, F., Küppers, O., Stein, S., Krüger, B., Wohlfahrt, P., Geroneit, I., Stahlhut, P., Grubeck, U., & Ignatius, A. (2024). Improving bone defect healing using magnesium phosphate granules with tailored degradation characteristics. *Dental materials*, 40(3), 508–519. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.019>.
6. Fu, W., Yuan, X., Feng, S., Ye, J., & He, F. (2023). Fabrication of nanocrystalline magnesium phosphate-based composite bioceramics using magnesium-containing phosphate glass as sintering additives, *Ceram. Int.*, 49(14), 23893–23902. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.238>.
7. Chen, T., Shuai, W., Fu, W., Li, Y., Wen, R., Fu, Q., He, F., & Yang, H. (2024). Improving mechanical strength and osteo-stimulative capacity of 3D-printed magnesium phosphate ceramic scaffolds by magnesium silicate additives. *Ceram. Int.*, 50(21), 43458–43465. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.197>.
8. Golafshan, N., Vorndran, E., Zaharievski, S., Brommer, H., Kadumudi, F. B., Dolatshahi-Pirouz, A., Gbureck, U., van Weeren, R., Castilho, M., & Malda, J. (2020). Tough magnesium phosphate-based 3D-printed implants induce bone regeneration in an equine defect model. *Biomaterials*, 261, 120302. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.120302>.
9. He, P., Zhao, Y., Wang, B., Wang, Y., Li, Y., Li, M., Chu, C., Xu, B., & Cong, Y. (2024). An injectable and absorbable magnesium phosphate bone cement designed for osteoporotic fractures. *Mater. Today. Chem.*, 38, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102086>.
10. Gao, Z., Liu, J., Zhang, M., Chen, P., Goto, T., Tu, R., & Dai, H. (2025). Multi-crosslinked network magnesium phosphate bone cement with high flexural properties. *Ceram. Int.*, 51(21), 34377–34389. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.162>.

11. Otto, P.F., Dümmler, N., Baumeister, F., Dehnel, J., Fuchs, J., Gbureck, D., Lochner, T., & Grubeck, U. (2025). Struvite and (K)-struvite cements with variable phase composition-controlled degradation profiles. *JACS.*, *108*, e70080. <https://doi.org/10.1111/jace.70080>.
12. Fuchs, A., Kreczy, D., Brückner, T., Gbureck, U., Stahlhut, P., Bengel, M., Hoess, A., Nies, B., Bator, J., Klammert, U., Linz, C., & Ewald, A. (2022). Bone regeneration capacity of newly developed spherical magnesium phosphate cement granules. *Clin. Oral. Investig.*, *26*(3), 2619–2633. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04231-w>.
13. Elhadad, A., Mezour, M.A., Abu Nada, L., Shurbaji, S., Mansour, A., Smith, S., Moussa, H., Lee, L., Pérez-Soriano, E.M., Murshed, M., Chromik, R., & Tamimi, F. 2D magnesium phosphate resorbable coating to enhance cell adhesion on titanium surfaces. *Mater. Chem. and Phys.*, *316*, 129114. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129114>.
14. Lee, J., Farag, M., Park, E. K., Lim, J., & Yun, H.S. (2014). A simultaneous process of 3D magnesium phosphate scaffold fabrication and bioactive substance loading for hard tissue regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, *36*, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.12.007>.
15. El-Sayed, S. A. M., ElShebiney, S., Beherei, H. H., Kumar, P., Choonara, Y. E., & Mabrouk, M. (2024). Copper-doped magnesium phosphate nanopowders for critical size calvarial bone defect intervention. *J. Biomed. Mater. Res.*, *112*(2), e35376. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35376>.
16. Lanzino, M.C., Höppel, A., Le, L.-Q., Morelli, S., Killinger, M., Mayr, M., Gbureck, U., & Seidenstuecker, M. (2025). Biodegradable, antibacterial TCP implant coatings with magnesium phosphate-based supraparticles. *J. of Biomed. Mater. Res. Part A*, *113*(7), e37963. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37963>.
17. Wehl, L., Schirnding, C. V., Bayer, M.C., Zhuzhgova, O., Engelke, H., & Bein, T. (2022). Mesoporous biodegradable magnesium phosphate-citrate nanocarriers amplify methotrexate anticancer activity in HeLa cells. *Bioconjugate Chem.*, *33*, 566–575. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.1c00565>.
18. Höppel, A., Bahr, O., Ebert, R., Popp, C., Gbureck, U., & Dembski, S.. (2025). Cu-doped magnesium phosphate supraparticles: A promising material for bone tissue regeneration. *JACS*, *108*, e70048. <https://doi.org/10.1111/jace.70048>.
19. Chaudhari, V.S., Kushram, P., & Bose S. (2024). Drug delivery strategies through 3D-printed calcium phosphate. *Trends in Biotechnology*, *42*(11), 1396–1409. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.05.006>.
20. Luan, X., Li, J., Liu, L., & Yang, Z. (2019). Preparation and characteristics of porous magnesium phosphate cement modified by diatomite. *Mat. Chem. and Phys*, *235*, 121742. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121742>.
21. Hövelmann, J., Stawski, T.M., Besselink, R., Feeman, H.M., Dietmann, K.M., Mayanna, S., Pauw, B.R., & Benning, L.G. (2019). A template-free and low temperature method for the synthesis of mesoporous magnesium phosphate with uniform pore structure and high surface area. *Nanoscale*, *11*(14), 6939–6951. <https://doi.org/10.1039/C8NR09205B>.
22. Lin, R., & Ding, Y. (2013). A Review on the Synthesis and Applications of Mesostructured Transition Metal Phosphates. *Materials*, *6*(1), 217–243. <https://doi.org/10.3390/ma6010217>.
23. Кузнецова Ю.В., Вольхин В.В., Пермьякова И.А. (2022). Регенерация азота и фосфора при переработке водных отходов производства путем осаждения струвита с использованием в качестве реагента активного промежуточного продукта. *Журнал прикладной химии*, *95*(4), 531–544. DOI: [10.31857/S0044461822040156](https://doi.org/10.31857/S0044461822040156).
24. Zhenyu, L., Jueshi, Q., Zhongyuan, L., Qian, L., & Qiulin, Z. (2012). Rapid Synthesis of Dittmarite by Microwave-Assisted Hydrothermal Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, *12*, 968396. <https://doi.org/10.1155/2012/968396>.
25. Dan L., Lili M., & Haizeng W. (2019). Preparation of uniform newberyite crystal in nonaqueous system. *Materials Letters*, *240*, 169–171. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.01.016>.

References:

1. Devi, B., Lalmazmliana, V., Maktumkari, S., Kumar, V., Roy, M., & Nandi, S. (2022). Magnesium phosphate bioceramics for bone tissue engineering. *The Chem. Rec.*, 22(11), e202200136. <https://doi.org/10.1002/tcr.202200136>.
2. Kaiser, F., Schröter, L., Stein, S., Krüger, B., Weichhold, J., Stahlhut, P., Ignatius, A., & Gbureck, U. (2022). Accelerated bone regeneration through rational design of magnesium phosphate cements, *Acta Biomaterialia*, 145, 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.04.019>.
3. Den Hollander, W., Patka, P., Klein, C.P., & Heidendal, G.A. (1991) Macroporous calcium phosphate ceramics for bone substitution: a tracer study on biodegradation with <sup>45</sup>Ca tracer. *Biomaterials*, 12(6), 569–573. [https://doi.org/10.1016/0142-9612\(91\)90053-D](https://doi.org/10.1016/0142-9612(91)90053-D).
4. Metsger, D.S., Dephilip, R.M., & Hayes, T.G. (1993). An autoradiographic study of calcium phosphate ceramic bone implants in turkeys. *Clin Orthopaedic and Rel Res*, 291, 283–294. <https://doi.org/10.1097/00003086-199306000-00033>.
5. Schröter, L., Kaiser, F., Küppers, O., Stein, S., Krüger, B., Wohlfahrt, P., Geroneit, I., Stahlhut, P., Grubeck, U., & Ignatius, A. (2024). Improving bone defect healing using magnesium phosphate granules with tailored degradation characteristics. *Dental materials*, 40(3), 508–519. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.019>.
6. Fu, W., Yuan, X., Feng, S., Ye, J., & He, F. (2023). Fabrication of nanocrystalline magnesium phosphate-based composite bioceramics using magnesium-containing phosphate glass as sintering additives, *Ceram. Int.*, 49(14), 23893–23902. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.238>.
7. Chen, T., Shuai, W., Fu, W., Li, Y., Wen, R., Fu, Q., He, F., & Yang, H. (2024). Improving mechanical strength and osteo-stimulative capacity of 3D-printed magnesium phosphate ceramic scaffolds by magnesium silicate additives. *Ceram. Int.*, 50(21), 43458–43465. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.197>.
8. Golafshan, N., Vorndran, E., Zaharievski, S., Brommer, H., Kadumudi, F. B., Dolatshahi-Pirouz, A., Gbureck, U., van Weeren, R., Castilho, M., & Malda, J. (2020). Tough magnesium phosphate-based 3D-printed implants induce bone regeneration in an equine defect model. *Biomaterials*, 261, 120302. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2020.120302>.
9. He, P., Zhao, Y., Wang, B., Wang, Y., Li, Y., Li, M., Chu, C., Xu, B., & Cong, Y. (2024). An injectable and absorbable magnesium phosphate bone cement designed for osteoporotic fractures. *Mater. Today. Chem.*, 38, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102086>.
10. Gao, Z., Liu, J., Zhang, M., Chen, P., Goto, T., Tu, R., & Dai, H. (2025). Multi-crosslinked network magnesium phosphate bone cement with high flexural properties. *Ceram. Int.*, 51(21), 34377–34389. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.162>.
11. Otto, P.F., Dümmler, N., Baumeister, F., Dehnel, J., Fuchs, J., Gbureck, D., Lochner, T., & Grubeck, U. (2025). Struvite and (K)-struvite cements with variable phase composition-controlled degradation profiles. *JACS.*, 108, e70080. <https://doi.org/10.1111/jace.70080>.
12. Fuchs, A., Kreczy, D., Brückner, T., Gbureck, U., Stahlhut, P., Bengel, M., Hoess, A., Nies, B., Bator, J., Klammert, U., Linz, C., & Ewald, A. (2022). Bone regeneration capacity of newly developed spherical magnesium phosphate cement granules. *Clin. Oral. Investig.*, 26(3), 2619–2633. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04231-w>.
13. Elhadad, A., Mezour, M.A., Abu Nada, L., Shurbaji, S., Mansour, A., Smith, S., Moussa, H., Lee, L., Pérez-Soriano, E.M., Murshed, M., Chromik, R., & Tamimi, F. 2D magnesium phosphate resorbable coating to enhance cell adhesion on titanium surfaces. *Mater. Chem. and Phys.*, 316, 129114. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129114>.
14. Lee, J., Farag, M., Park, E. K., Lim, J., & Yun, H.S. (2014). A simultaneous process of 3D magnesium phosphate scaffold fabrication and bioactive substance loading for hard tissue regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, 36, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.12.007>.

15. El-Sayed, S. A. M., ElShebiney, S., Beherei, H. H., Kumar, P., Choonara, Y. E., & Mabrouk, M. (2024). Copper-doped magnesium phosphate nanopowders for critical size calvarial bone defect intervention. *J. Biomed. Mater. Res.*, *112*(2), e35376. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35376>.
16. Lanzino, M.C., Höppel, A., Le, L.-Q., Morelli, S., Killinger, M., Mayr, M., Gbureck, U., & Seidenstuecker, M. (2025). Biodegradable, antibacterial TCP implant coatings with magnesium phosphate-based supraparticles. *J. of Biomed. Mater. Res. Part A*, *113*(7), e37963. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37963>.
17. Wehl, L., Schirnding, C. V., Bayer, M.C., Zhuzhgova, O., Engelke, H., & Bein, T. (2022). Mesoporous biodegradable magnesium phosphate-citrate nanocarriers amplify methotrexate anticancer activity in HeLa cells. *Bioconjugate Chem.*, *33*, 566–575. <https://doi.org/10.1021/acs.bioconjchem.1c00565>.
18. Höppel, A., Bahr, O., Ebert, R., Popp, C., Gbureck, U., & Dembski, S.. (2025). Cu-doped magnesium phosphate supraparticles: A promising material for bone tissue regeneration. *JACS*, *108*, e70048. <https://doi.org/10.1111/jace.70048>.
19. Chaudhari, V.S., Kushram, P., & Bose S. (2024). Drug delivery strategies through 3D-printed calcium phosphate. *Trends in Biotechnology*, *42*(11), 1396–1409. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.05.006>.
20. Luan, X., Li, J., Liu, L., & Yang, Z. (2019). Preparation and characteristics of porous magnesium phosphate cement modified by diatomite. *Mat. Chem. and Phys*, *235*:121742. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.121742>.
21. Hövelmann, J., Stawski, T.M., Besselink, R., Feeman, H.M., Dietmann, K.M., Mayanna, S., Pauw, B.R., & Benning, L.G. (2019). A template-free and low temperature method for the synthesis of mesoporous magnesium phosphate with uniform pore structure and high surface area. *Nanoscale*, *11*(14), 6939–6951. <https://doi.org/10.1039/C8NR09205B>.
22. Lin, R., & Ding, Y. (2013). A Review on the Synthesis and Applications of Mesostructured Transition Metal Phosphates. *Materials*, *6*(1), 217–243. <https://doi.org/10.3390/ma6010217>.
23. Kuznetsova Yu.V., Vol'khin V.V., & Permyakova I.A. (2022). Recovery of nitrogen and phosphorus in processing of aqueous production wastes by precipitation of struvite using an active intermediate as a reagent. *Russian J. Appl. Chem.*, *95*(4), 588–601. <https://doi.org/10.1134/S1070427222040164>.
24. Zhenyu, L., Jueshi, Q., Zhongyuan, L., Qian, L., & Qiulin, Z. (2012). Rapid Synthesis of Dittmarite by Microwave-Assisted Hydrothermal Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, *12*, 968396. <https://doi.org/10.1155/2012/968396>.
25. Dan L., Lili M., & Haizeng W. (2019). Preparation of uniform newberyite crystal in nonaqueous system. *Materials Letters*, *240*, 169–171. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.01.016>.