

DOI: 10.18721/JPM.111111

УДК 577.114

## **МОРФОЛОГИЯ ВЫСУШЕННЫХ НАНОГЕЛЬ-ПЛЕНОК БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, ПРОПИТАННЫХ РАСТВОРОМ НИТРАТА СЕРЕБРА**

**А.К. Хрипунов<sup>1</sup>, Т.П. Степанова<sup>1</sup>, Н.Н. Сапрыкина<sup>1</sup>, Э.П. Астапенко<sup>1</sup>,  
Д.П. Романов<sup>2</sup>, А.А. Ткаченко<sup>3</sup>, В.М. Капралова<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Институт высокомолекулярных соединений РАН,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>2</sup> Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Проведено сравнительное исследование высушенных пленок целлюлозы *Gluconacetobacter xylinus* (ЦГХ) в нативной и дезинтегрированной формах, обработанных водным раствором  $\text{AgNO}_3$ . Для исследований использовались методы сканирующей электронной микроскопии (SEM) и рентгеноструктурного анализа. Установлено, что образцы имеют надмолекулярную структуру пленок ЦГХ, известную в настоящее время и представляющую собой пространственную сетку нанолент из ориентационно-упорядоченных макрофибрилл. Последние содержат чередующиеся аморфные и кристаллические области. Изучение указанными методами показало присутствие восстановленного серебра  $\text{Ag}^0$  в виде наночастиц размером 10 – 50 нм, располагающихся в вакуолях сетки ЦГХ вблизи элементов морфологической структуры.

**Ключевые слова:** наногель-пленка, бактериальная целлюлоза, СЭМ, рентгеноструктурный анализ

**Ссылка при цитировании:** Хрипунов А.К., Степанова Т.П., Сапрыкина Н.Н., Астапенко Э.П., Романов Д.П., Ткаченко А.А., Капралова В.М. Морфология высушенных наногель-пленок бактериальной целлюлозы, пропитанных раствором нитрата серебра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 1. С. 112 – 121. DOI: 10.18721/JPM.111111

## **MORPHOLOGY OF DRIED NANOGEL FILMS OF BACTERIAL CELLULOSE IMPREGNATED WITH THE SILVER NITRATE SOLUTION**

**A.K. Khripunov<sup>1</sup>, T.P. Stepanova<sup>1</sup>, N.N. Saprykina<sup>1</sup>, E.P. Astapenko<sup>1</sup>,  
D.P. Romanov<sup>2</sup>, A.A. Tkachenko<sup>3</sup>, V.M. Kapralova<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Macromolecular Compounds of Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> I.V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry of Russian Academy of Sciences,  
St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>3</sup> St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>4</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation



A comparative study of dried nanogel films of the *Gluconacetobacter xylinus* cellulose (GXC) in native and disintegrated forms treated with  $\text{AgNO}_3$  solution has been carried out by means of SEM and XRD. The supermolecular structure of samples studied was shown to be 3D network of nanostrips formed with oriented macrofibrils in which amorphous and crystalline regions alternate. XRD patterns of the GXC dry films, pre-treated with  $\text{AgNO}_3$  aqueous solution, demonstrate both residual  $\text{AgNO}_3$  and reduced  $\text{Ag}^0$ , the latter positioned in longwise direction of morphologic structure elements. The XRD and SEM studies of dried GXC films disintegrated in 1 %  $\text{AgNO}_3$  aqueous solution showed the presence of reduced  $\text{Ag}^0$  in the form of nanoparticles 10 – 50 nm in diameter located in the free volume of the GXC 3D network nearby structural elements.

**Keywords:** nanogel film; bacterial cellulose; SEM; XRD

**Citation:** A.K. Khripunov, T.P. Stepanova, N.N. Saprykina, E.P. Astapenko, D.P. Romanov, A.A. Tkachenko, V.M. Kapralova, Morphology of dried nanogel films of bacterial cellulose impregnated with the silver nitrate solution, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 11(1) (2018) 112 – 121. DOI: 10.18721/JPM.11111

### Введение

В последнее десятилетие уделяется чрезвычайное внимание исследованиям, посвященным многообразному практическому использованию целлюлозы *Gluconacetobacter xylinus* (ЦГХ). С целью увеличения выхода и снижения себестоимости этого продукта, в качестве источника углерода изучают чистые сахара и разнообразные сахаросодержащие отходы [1, 2]. Однако среди публикаций по изучению свойств ЦГХ, встречается мало исследований, посвященных морфологии наногель-пленки (НГП) ЦГХ [3]. Между тем, эта пленка имеет несомненные перспективы использования, прежде всего, в медицине (например, в качестве раневого покрытия, насыщаемого разнообразными лекарственными препаратами), где важны исследования вида взаимодействия перспективного антисептика на основе серебра с элементами надмолекулярной структуры пленок ЦГХ [4, 5].

Целью настоящей работы являлось сравнительное изучение морфологии нативной ЦГХ и ее дезинтегрированной формы, предварительно обработанных раствором нитрата серебра.

### Методика эксперимента

**Подготовка образцов.** Биосинтез НГП ЦГХ был описан ранее [1, 4]. После удаления клеток общепринятым методом кипячения в однопроцентном растворе едкого натрия и тщательной промывки дистиллированной водой, полученная НГП ЦГХ по-

сле стерилизации хранилась в герметически закрытых сосудах при постоянной температуре  $+5\text{ }^\circ\text{C}$  вплоть до использования.

С целью определения молекулярной массы вискозиметрическим методом проведено растворение сухой пленки ЦГХ в кадоксене (комплекс окиси кадмия в водном растворе этилендиамина) для получения молекулярно-дисперсных растворов [6]. Значение молекулярной массы ЦГХ составило  $3,89 \cdot 10^5$  Да.

Пленку целлюлозы *Gluconacetobacter xylinus*, полученную биосинтезом, отжимали с использованием пресса; при этом удалялось до 95 % воды. Далее пленку помещали в 1%-й раствор нитрата серебра  $\text{AgNO}_3$  примерно на 12 ч. Насыщенную этим раствором пленку охватывали тороидальными зажимами и сушили при комнатной температуре.

Дезинтеграцию исходной нативной пленки ЦГХ проводили добавлением некоторого количества дистиллированной воды и 100 мл водного 1%-го раствора  $\text{AgNO}_3$  (общий объем раствора составлял 310 мл). Реакционной емкостью служил двухлитровый блендер JTC Omniblend-1 (model TM-767); скорость вращения его ножей была 15000 об/мин. Дезинтеграция проводилась в три этапа, по 5 мин каждый, с перерывами по 30 мин для охлаждения коллоидной суспензии до комнатной температуры. Гель-пленку дезинтегрированной ЦГХ сушили в тех же зажимах, что и нативную. Полученные сухие образцы далее

исследовались методами SEM и рентгеновской дифракции.

**Метод рентгеновской дифракции.** Для исследования высушенных исходных и деинтегрированных пленок использовали установку ДРОН-3М. Применялось рентгеновское излучение  $\text{CuK}_\alpha$ .

**Сканирующая электронная микроскопия (SEM).** Пленки ЦГХ исследовали на сканирующем электронном микроскопе Supra 55VP фирмы Zeiss (Германия). Для обеспечения электропроводящих свойств образцов и исключения помех, вызванных накоплением поверхностного заряда при сканировании, а также для повышения контрастности, на образцы предварительно напыляли слой платины толщиной 15 – 20 нм. Этот слой наносился методом катодного распыления на установке Quorum-150 (Великобритания). Затем образцы приклеивали двусторонним электропроводящим скотчем на столик микроскопа. Для изучения мор-

фологии поверхности использовали режим вторичных электронов (SE2).

**Энергодисперсионный микрорентгено-спектральный анализ (ЭДС).** Элементный состав образцов и состав отдельных фаз определяли с помощью системы микроанализа INCA Energy с детектором X-Max-80 фирмы Oxford, комплектуемой с микроскопом Supra 55VP. Для идентификации фаз в образце регистрировали спектры как со всей его поверхности, так и с ее отдельных точек.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Известно [7 – 11], что макромолекулы целлюлозы, мономерным звеном которых является целлобиоза, имеют тенденцию к взаимопорядочению за счет внутри- и межмолекулярных водородных связей. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, SEM и TEM, **формирование простран-**

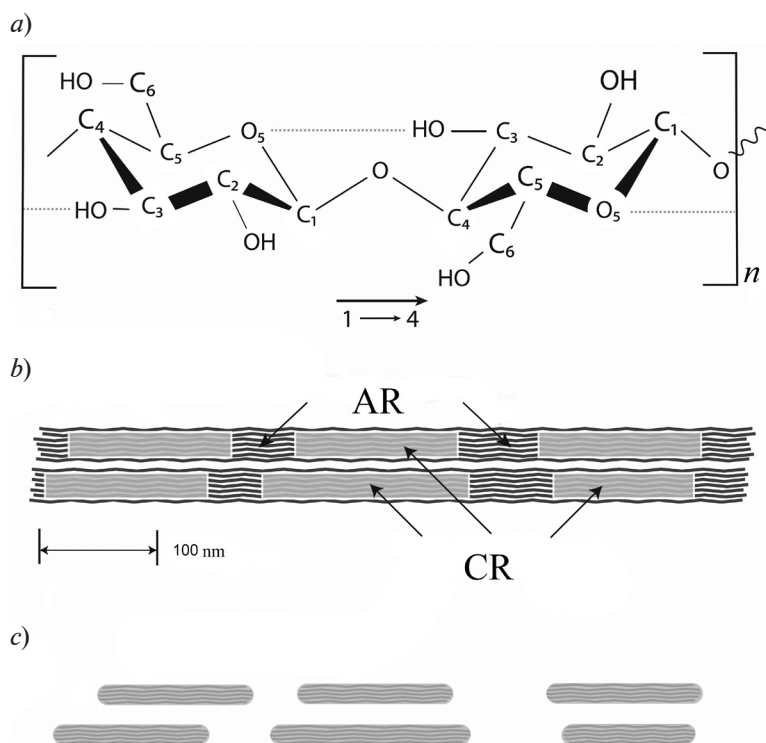


Рис. 1. Схемы строения моновена макромолекулы целлюлозы (a), фрагмента ленты из макрофибрил в одной из предполагаемых конфигураций кристаллитных (CR) и аморфных (AR) областей (b), а также одиночных нанокристаллов ЦГХ после растворения неупорядоченных областей кислотным гидролизом (c). Стрелка указывает направление связи  $\text{C}_1 - \text{C}_4$  (a)



ственной морфологической структуры НПП ЦГХ включает образование микрофибрилл (состоят примерно из семи ориентационно-упорядоченных макромолекул целлюлозы); далее развивается упорядочение этих микрофибрилл в макрофибриллы; последние создают упорядоченные ленты с наноканалами между ними.

Вследствие конформационных сбоев в присоединении звеньев целлобиозы в процессе биосинтеза, микрофибриллы состоят

из чередующихся кристаллитов и аморфных участков, «необходимых» в упаковке микрофибрилл, чтобы обеспечить гибкость в пространственной морфологической структуре целлюлозы. На рис. 1 представлена известная [8] схема строения мономерного звена макромолекулы целлюлозы, ленты и одиночных кристаллитов ЦГХ.

На рис. 2 представлены дифрактограммы нативной и дезинтегрированной пленок ЦГХ. Видно, что в обоих случаях наблюда-

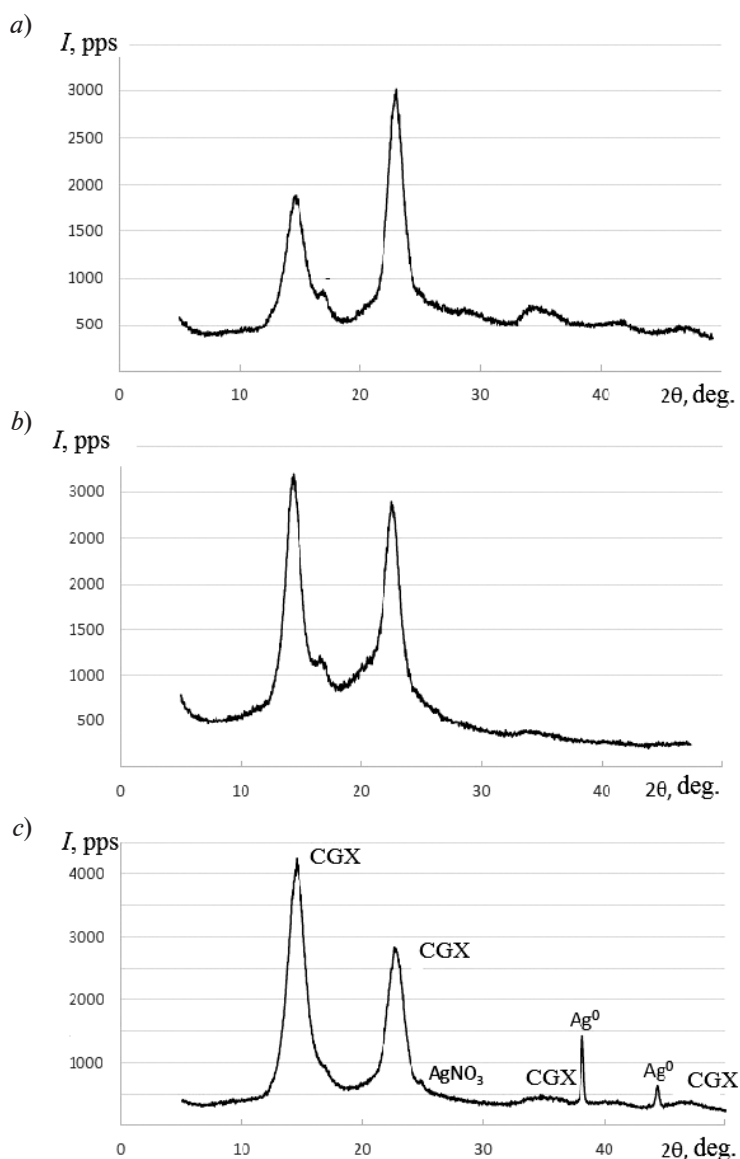


Рис. 2. Дифрактограммы пленок ЦГХ: исходной нативной (a), морфологически более упорядоченной, дезинтегрированной (b) и обработанной раствором  $AgNO_3$  в процессе ее дезинтеграции (c)

Таблица

Результаты энергодисперсионного анализа образцов ЦГХ, обработанных 1%-м раствором  $\text{AgNO}_3$

Пленка ЦГХ	Химический состав, ат.%				Ag/N
	C	N	O	Ag	
Нативная	72,0	0,3	26,0	1,7	5,7
Дезинтегрированная	54,5	5,5	30,0	10,0	1,8

ется три основных пика рассеяния рентгеновских лучей, которые локализованы при значениях  $2\theta$ , равных  $15,0^\circ$ ,  $16,6^\circ$  и  $22,4^\circ$ , что указывает на сохранение морфологической структуры целлюлозы после дезинтеграции пленки ЦГХ. Ширина пиков отражает частичную кристалличность ЦГХ. Меньшая ширина и большая высота первого пика интенсивности (рис. 2, *b*) указывает на увеличение степени ориентационного порядка

в кристаллических объектах после дезинтеграции пленки ЦГХ и свидетельствует (как показано в работе [7]), о сохранении постоянной стехиометрии коллоидов в водных суспензиях. На дифрактограмме, представленной на рис. 2, *c*, фиксируются области, отражающие наличие наночастиц серебра  $\text{Ag}^0$  и нитрата серебра  $\text{AgNO}_3$  в нативной и дезинтегрированной пленках ЦГХ (дезинтеграция проведена в присутствии раствора

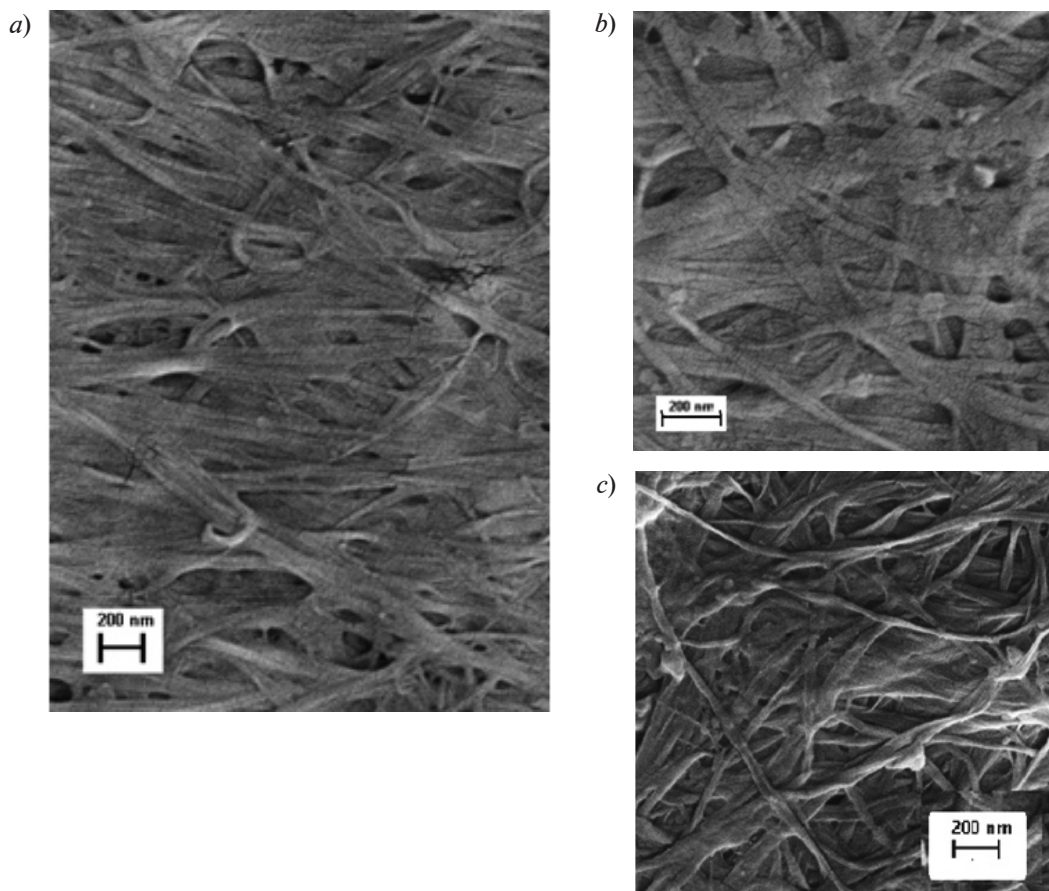


Рис. 3. Микрофотографии высушенных пленок нативной (*a*, *b*) и дезинтегрированной (*c*) ЦГХ, полученные методом SEM при увеличении в 50 тыс. (*a*, *c*) и в 130 тыс. (*b*) раз





серебра). Такая идентификация подтверждается данными элементного микроанализа (см. таблицу), с помощью которого получены усредненные сравнительные результаты содержания химических элементов в нативной и дезинтегрированной пленках ЦГХ, обработанных 1%-м раствором  $\text{AgNO}_3$ .

На рис. 3 приведены микрофотографии пленок нативной и дезинтегрированной ЦГХ, полученные методом SEM при различном увеличении. На рис. 3, *a* видны характерные ленточные структуры из фибрилл, а при большем увеличении (рис. 3, *b*) в микрофибриллах можно наблюдать чередующиеся участки кристаллитов (их размер составляет около 10 нм) и аморфных областей. На снимках рис. 3, *c* отчетливо различимы объекты дезинтеграции пленок ЦГХ: отдельные разорванные ленты и хаотично расположенные единичные макрофибриллы.

На рис. 4 представлены фотография и микрофотография высушенной пленки нативной ЦГХ, предварительно обработанной 1%-м раствором  $\text{AgNO}_3$ . На поверхности пленки (рис. 4, *a*) видны дендриты восстановленного серебра, визуализирующие элементы ленточной морфологической струк-

туры ЦГХ. На микрофотографии (рис. 4, *b*) различимы как дендриты, так и наночастицы серебра (30 – 80 нм), заполняющие пространство между лентами.

Иная картина имеет место в высушенных пленках водных суспензий дезинтегрированной ЦГХ, полученных введением в блендер 1%-го раствора  $\text{AgNO}_3$  в процессе дезинтеграции ЦГХ. На рис. 5 представлена микрофотография таких пленок, на которых фиксируется образование наночастиц  $\text{Ag}^0$  размером 10 – 50 нм, находящихся в пустотах сетки, образованной фрагментами лент дезинтегрированной ЦГХ. Следует отметить, что наночастицы серебра формируются вблизи элементов морфологической структуры ЦГХ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в образцах высушенных пленок ЦГХ, обработанных 1%-м раствором  $\text{AgNO}_3$ , содержатся как наночастицы  $\text{Ag}^0$ , так и соль  $\text{AgNO}_3$ . Образцы пленок неоднородны по содержанию наночастиц. Однако очевидно, что надмолекулярная структура ЦГХ обладает способностью восстанавливать атомы серебра из его соли и приводить к возникновению либо дендритов из атомов серебра в нативной ЦГХ, либо к обра-

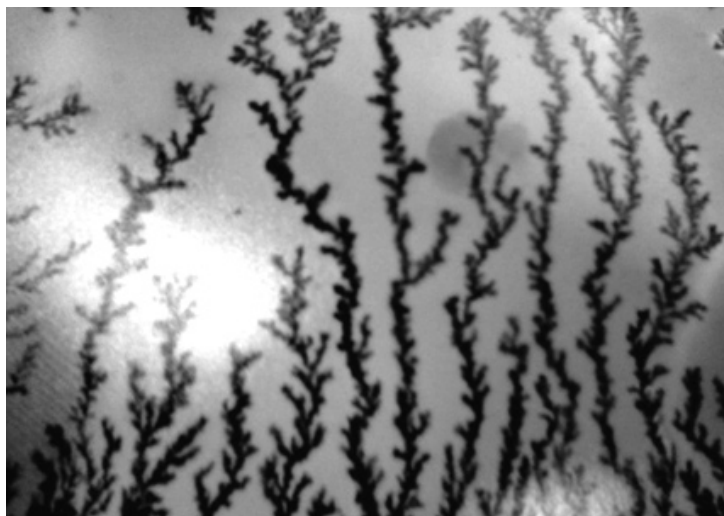
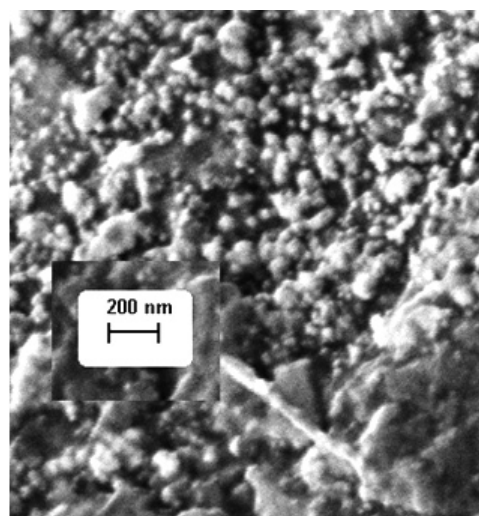
*a)**b)*

Рис. 4. Фотография (*a*) и микрофотография, полученная методом SEM (*b*), высушенной нативной пленки ЦГХ, предварительно обработанной 1%-м раствором  $\text{AgNO}_3$ . Увеличение в 1,5 (*a*) и в 50 тыс. (*b*) раз.

На фотографии дендриты восстановленного серебра визуализируют элементы надмолекулярной структуры образца

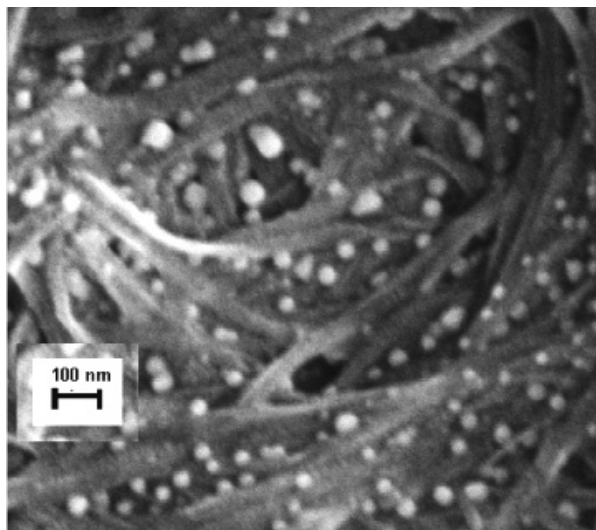


Рис. 5. Микрофотография пленки ЦГХ, обработанной 1%-м раствором  $\text{AgNO}_3$  в процессе дезинтеграции. Получена методом SEM при увеличении в 100 тыс. раз

зованию изолированных наночастиц серебра при дезинтеграции ЦГХ в присутствии раствора  $\text{AgNO}_3$ .

Это обстоятельство указывает на существование в изучаемой целлюлозе хемосорбционных взаимодействий, ответственных за ее восстановительную способность по отношению к атомам серебра вблизи элементов морфологической структуры. Такой результат расширяет представления о свойствах ЦГХ, для которой ранее были известны лишь молекулярные взаимодействия, а именно – внутри- и межмолекулярные водородные связи, а также Ван-дер-Ваальсовы связи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклагина Ю.Г., Хрипунов А.К., Ткаченко А.А., Копейкин В.В., Матвеева Н.А., Лаврентьев В.К., Нилова В.К., Суханова Т.Е., Смыслов Р.Ю., Занавескина И.С., Клечковская В.В., Фейгин Л.А. Сорбционные свойства гель-пленок бактериальной целлюлозы // Журнал прикладной химии. 2005. Т. 78. № 7. С. 1197–1202.
2. Jozala A.A., de Lancastre-Novaes L.C., Lopes A.M., et al. Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2016. Vol. 100. No. 5. Pp. 2063–2072.
3. Thompson N.S., Carlson J.A., Kaustinen

#### Выводы

Исследовано влияние механической дезинтеграции на морфологию нативной пленки целлюлозы *Gluconacetobacter xylinus* (ЦГХ) с помощью методов сканирующей электронной микроскопии и рентгенодифракционного анализа. Установлено, что

в дезинтегрированных пленках сохраняется характерная для ЦГХ морфологическая структура. Однако происходит некоторое изменение ориентационного порядка и образование фоновой аморфной фазы из дезинтегрированных элементов;

в пленках нативной и дезинтегрированной ЦГХ, обработанных раствором нитрата серебра, присутствуют наночастицы серебра  $\text{Ag}^0$  и остаточный нитрат серебра;

в высушенных и обработанных раствором пленках исходной нативной ЦГХ образуются дендриты из восстановленного серебра, которые видны невооруженным глазом и визуализируют ее морфологическую структуру;

в высушенных пленках ЦГХ, дезинтегрированных в присутствии 1%-го раствора нитрата серебра, обнаружены наночастицы серебра с преимущественным размером 10 – 50 нм, которые располагаются в вакуолях сетки ЦГХ вблизи элементов структуры.

Обнаружено существование в надмолекулярной структуре ЦГХ хемосорбционных взаимодействий, способных восстанавливать атомарное серебро из его соли.

- Н.М., Uhlin K.I. Tunnel structures in *Acetobacter xylinum* // Int. J. Biol. Macromol. 1988. Vol. 10. No. 2. Pp. 126–127.

4. Попов В.А. Раневый процесс: нанобиотехнологии оптимизации. СПб.: Спецлит, 2013. 199 с.

5. Хрипунов А.К., Степанова Т.П., Антоненкова Е.В, Ткаченко А.А., Попов В.А. О некоторых свойствах воды в наногель-пленках целлюлозы *Gluconacetobacter xylinus* // Высокие технологии, экономика, промышленность. Сб. статей 13-й Междунар. научн.-практ. конф. «Фундаменталь-



ные и прикладные исследования, разработки и применение высоких технологий в промышленности и экономике». СПб., 24–26 мая 2012. Под ред. А.П. Кудинова. Т. 2. Ч. 1. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. С. 261–262.

6. **Болотникова Л.С., Самсонова Т.И.** Зависимость между молекулярным весом и характеристической вязкостью целлюлозы в растворах кадмий-этилендиаминового комплекса // Высокомолекулярные соединения. 1964. Т. 6. № 3. С. 533–537.

7. **Хрипунов А.К., Степанова Т.П., Ткаченко А.А., Романов Д.П., Астапенко Е.П., Капралова В.М.** Диэлектрические свойства и микроструктура водных суспензий дезинтегрированных наногель-пленок бактериальной целлюлозы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 2. С. 45–57

8. **Moon R.J., Martini A., Nairn J., Simonsen**

**J., Youngblood J.** Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites // Chem. Soc. Rev. 2011. Vol. 40. No. 7. Pp. 3941–3994.

9. **Brown R.M., Jr.** The biosynthesis of cellulose // Journ. Mol. Sci. A. Pure Appl. Chem. 1996. Vol. A 33. No. 10. Pp. 1345–1373.

10. **Kondo T., Nojiri M., Hishikawa Yu., Togawa E., Romanovicz D., Brown, R.M., Jr.** Biodirected epitaxial nanodeposition of polymers on oriented macromolecular templates // Proc. of Nat. Acad. Sci. (PNAS). 2002. Vol. 99. No. 22. Pp. 14008–14013.

11. **Бабушкина Т.А., Климова Т.П., Штыкова Э.В., Дембо К.А., Волков В.В., Хрипунов А.К., Клечковская В.В.** Исследование гелевых пленок целлюлозы *Acetobacter xylinum* и ее модифицированных образцов методами ЯМР <sup>1</sup>H, криопротометрии и малоуглового рентгеновского рассеяния // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 2. С. 344–349.

*Статья поступила в редакцию 12.12.2017, принята к публикации 14.12.2017.*

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХРИПУНОВ Альберт Константинович** — кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

199004, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 31  
xelmie@mail.macro.ru

**СТЕПАНОВА Тамара Павловна** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

199004, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 31  
t\_stepanova2005@mail.ru

**САПРЫКИНА Наталья Николаевна** — кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

199004, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 31  
saprykina@hq.macro.ru

**АСТАПЕНКО Элла Павловна** — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

199004, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 31  
imc@hq.macro.ru

**РОМАНОВ Дмитрий Павлович** — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2  
ichsran@isc.nw.ru

**ТКАЧЕНКО Альбина Александровна** — кандидат биологических наук, старший преподаватель Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

199034, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9  
albina.tkachenko@mail.ru



**КАПРАЛОВА Виктория Маратовна** – кандидат физико-математических наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
kapralova2006@yandex.ru

#### REFERENCES

- [1] Yu.G. Baklagina, A.K. Khripunov, A.A. Tkachenko, et al., Sorption properties of gel films of bacterial cellulose, *Russian Journal of Applied Chemistry*. 78 (7) (2005) 1176–1181.
- [2] A.A. Jozala, L.C. de Lancastre-Novaes, A.M. Lopes, et al., Bacterial nanocellulose production and application: a 10-year overview, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100 (5) (2016) 2063–2072.
- [3] N.S. Thompson, J.A. Carlson, H.M. Kaustinen, K.I. Uhlin, Tunnel structures in *Acetobacter xylinum*, *Int. J. Biol. Macromol.* 10 (2) (1988) 126–127.
- [4] V.A. Popov, Ranevyy protsess: nanobiotehnologii optimizatsii [Wound process: optimization nanobiotechnologies], St. Petersburg, SpetsLit, 2013.
- [5] A.K. Khripunov, T.P. Stepanova, E.V. Antonenkova, et al., O nekotorykh svoystvakh vody v nano-gel-plenkakh tsellyulozy *Gluconacetobacter xylinus* [On some properties of water in the nanogel films of *Gluconacetobacter xylinus* cellulose], *High Technologies, Economics, Industry, Collection of Sci. Articles*, Ed. A.P. Kudinov, St. Petersburg, Polytechn. Univ. Publ. House, 2-1 (2013) 261–262.
- [6] L.S. Bolotnikova, T.I. Samsonova, Zavisimost mezhdu molekulyarnym vesom i kharakteristicheskoy vyazkostyu tsellyulozy v rastvorakh kadmii etilen diaminovogo kompleksa. [A correlation between a molecular weight and the viscosity of cellulose in the solutions of cadmium ethylene diamine complex], *Polymer Sci.* 6 (3) (1964) 533–537.
- [7] A.K. Khripunov, T.P. Stepanova, A.A. Tkachenko, et al., Dielectric properties and microstructure of the disintegrated nanogel films of bacterial cellulose, *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 10 (2) (2017) 45–57.
- [8] R.J. Moon, A. Martini, J. Nairn, et al., Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites, *Chem. Soc. Rev.* 40 (7) (2011) 3941–3944.
- [9] R.M. Brown, Jr. The biosynthesis of cellulose, *Journ. Mol. Sci., A. Pure Appl. Chem.* 1996. A 33 (10) (1996) 1345–1373.
- [10] T. Kondo, M. Nojiri, Yu. Hishikawa, et al., Biodirected epitaxial nanodeposition of polymers on oriented macromolecular templates, *Proc. of Nat. Acad. Sci. (PNAS)*. 99 (22) (2002) 14008–14013.
- [11] T.A. Babushkina, T.P. Klimova, E.V. Shtykova, et al., Study of gel films of *Acetobacter xylinum* cellulose and its modified samples by <sup>1</sup>H NMR, crioporometry and small-angle X-ray scattering, *Crystallography Reports*. 55 (2) (2010) 344–349.

Received 12.12.2017, accepted 14.12.2017.

#### THE AUTHORS

**KHRIPUNOV Albert K.**

*Institute of Macromolecular Compounds RAS*

31 Bolshoy Ave. V.O., St. Petersburg, 199004, Russian Federation  
xelmie@mail.macro.ru

**STEPANOVA Tamara P.**

*Institute of Macromolecular Compounds RAS*

31 Bolshoy Ave. V.O., St. Petersburg, 199004, Russian Federation  
t\_stepanova2005@mail.ru

**SAPRYKINA Nataliya N.**

*Institute of Macromolecular Compounds RAS*

31 Bolshoy Ave. V.O., St. Petersburg, 199004, Russian Federation  
saprykina@hq.macro.ru

**ASTAPENKO Ella P.**

*Institute of Macromolecular Compounds RAS*

31 Bolshoy Ave. V.O., St. Petersburg, 199004, Russian Federation  
imc@hq.macro.ru



**ROMANOV Dmitriy P.**

*I.V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry*

2 Makarova Emb., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

ichsran@isc.nw.ru

**TKACHENKO Albina A.**

*St. Petersburg State University*

7-9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

albina.tkachenko@mail.ru

**KAPRALOVA Victoria M.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

kapralova2006@yandex.ru