

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА И АНТИФУНГИЦИДНЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КЛОТРИМАЗОЛА И ПОЛИМЕРОВ, СФОРМИРОВАННЫХ ИЗ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

М.А. Ярмоленко<sup>1</sup>, Цзян Сяо Хун<sup>2</sup>, А.А. Рогачёв<sup>3</sup>, А.В. Рогачёв<sup>1</sup>, А.С. Руденков<sup>1</sup>,  
О.А. Ярмоленко<sup>4</sup>, С.А. Фролов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

<sup>2</sup>Нанкинский университет науки и технологии

<sup>3</sup>Институт химии новых материалов Национальной Академии Наук Беларуси, Минск

<sup>4</sup>Гомельский государственный медицинский университет

## MOLECULAR STRUCTURE AND ANTI-FUNGICIDAL PROPERTIES OF COATINGS BASED ON CLOTRIMAZOLE AND POLYMERS FORMED FROM THE ACTIVE GAS PHASE

M.A. Yarmolenko<sup>1</sup>, Jiang Xiao Hong<sup>2</sup>, A.A. Rogachev<sup>3</sup>, A.V. Rogachev<sup>1</sup>,  
A.S. Rudenkov<sup>1</sup>, V.A. Yarmolenko<sup>4</sup>, S.A. Frolov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Francisk Skorina Gomel State University

<sup>2</sup>Nanjing University of Science and Technology

<sup>3</sup>Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

<sup>4</sup>Gomel State Medical University

**Аннотация.** Определены особенности молекулярной структуры, химического состава и антифунгицидные свойства покрытий на основе клотримазола, полиуретана (ПУ), поливинилхлорида (ПВХ), сформированных из активной газовой фазы, образованной электронно-лучевым диспергированием соединений в вакууме. Установлено, что химический состав покрытия на основе клотримазола практически полностью соответствует химическому составу исходного лекарственного соединения. Некоторое снижение хлора в покрытии в сравнении с исходным лекарственным соединением объясняется частичной деструкцией С–Сl связей под действием потока электронов. Установлена высокая эффективность регулирования пролонгированного высвобождения лекарственного соединения путем формирования композиционных покрытий. Показано, что фунгицидная активность композиционных покрытий в значительной степени определяется свойствами полимерной матрицы. Более высокую фунгицидную активность проявляют покрытия на основе клотримазола и продуктов электронно-лучевого диспергирования ПВХ.

**Ключевые слова:** электронно-лучевое диспергирование, покрытие, клотримазол, полиуретан, поливинилхлорид, молекулярная структура, свойства.

**Для цитирования:** Молекулярная структура и антифунгицидные свойства покрытий на основе клотримазола и полимеров, сформированных из активной газовой фазы / М.А. Ярмоленко, Цзян Сяо Хун, А.А. Рогачёв, А.В. Рогачёв, А.С. Руденков, О.А. Ярмоленко, С.А. Фролов // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 1 (58). – С. 50–56. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_1\\_58\\_50](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_50). – EDN: SILLPY

**Abstract.** The features of the molecular structure, chemical composition and antifungal properties of the coatings based on clotrimazole, polyurethane (PU), polyvinyl chloride (PVC), formed from the active gas phase formed by electron beam dispersion of compounds in a vacuum, were determined. It was found that the chemical composition of the clotrimazole-based coating almost completely corresponds to the chemical composition of the original drug compound. A slight decrease in chlorine in the coating compared to the original drug compound is explained by the partial destruction of C–Cl bonds under the influence of an electron flow. The high efficiency of regulating the prolonged release of a drug compound by forming composite coatings has been established. It has been shown that the fungicidal activity of composite coatings is largely determined by the properties of the polymer matrix. The coatings based on clotrimazole and graphitized PVC exhibit higher activity.

**Keywords:** electron beam dispersion, coating, clotrimazole, polyurethane, polyvinyl chloride, molecular structure, properties.

**For citation:** Molecular structure and anti-fungal properties of coatings based on clotrimazole and polymers formed from the active gas phase / M.A. Yarmolenko, Jiang Xiao Hong, A.A. Rogachev, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov, V.A. Yarmolenko, S.A. Frolov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 1 (58). – P. 50–56. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_1\\_58\\_50](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_50) (in Russian). – EDN: SILLPY

### Введение

Наиболее актуальной проблемой современной медицины является возникновение биоопленок

на поверхности имплантатов. При этом, несмотря на наличие современных противомикробных препаратов, смертность от инфекций, вызванных

образованием биопленок, остаётся высокой с прогнозируемым ее дальнейшим ростом в будущем [1], [2]. Особое место занимают смешанные биопленки, представляющие собой сообщества бактерий и грибов. В полимикробных биопленках реализуются сложные физические и биологические взаимодействия между бактериями и грибами, что значительно повышает их устойчивость к противомикробным и противогрибковым лекарственным соединениям, средствам системной и местной терапии. Одним из направлений предупреждения возникновения биопленок на поверхностях имплантатов является снижение бактериальной адгезии к имплантату. Это возможно путем придания имплантату заданной топографии [3], использования функциональных слоев, содержащих в своем объеме антибактериальные и антифунгальные соединения. Высокая шероховатость поверхности имплантата способствует быстрому образованию биопленки. Нанесение тонкослойных покрытий с заданными поверхностными антибактериальными и противомикробными свойствами не влияет на физико-механические характеристики имплантатов и позволяет в полном объеме реализовать принцип самоочистки в результате их медленного растворения в организме.

Выбор лекарственного препарата, удовлетворяющего требованиям, предъявляемым для такого рода покрытий с учетом специфики имплантата, является сложной задачей. Помимо медико-биологических аспектов, важным является выбор наиболее эффективных, с технологической точки зрения, приемов нанесения покрытий, гарантирующих их функциональные свойства в течение заданного периода лечения. Снижение до минимума вероятности возникновения устойчивых патогенных микроорганизмов может быть достигнуто одновременным применением нескольких лекарственных соединений, характеризующихся различным механизмом бактерицидного действия [4], [5]. Метод электронно-лучевого диспергирования исходных соединений позволяет в стерильных условиях наносить покрытия на основе широкой номенклатуры лекарственных и полимерных материалов, характеризующихся различной кинетикой высвобождения лекарственного компонента [6]. По мнению ряда авторов, наиболее перспективными материалами матрицы, обеспечивающей контролируемое высвобождение лекарственного соединения, являются биокерамика, наночастицы металлов, широкий класс органических ненасыщенных соединений [7], [8]. При этом комбинирование неорганических и органических соединений позволяет формировать покрытия с повышенными прочностными характеристиками, являющимися также источником не только лекарственного компонента, но и минеральных элементов.

Основной целью настоящей работы является установление молекулярной структуры, химического состава и противогрибковых свойств покрытий на основе клотримазола, полиуретана (ПУ), поливинилхлорида (ПВХ), формируемых из активной газовой фазы, образованной электронно-лучевым диспергированием соединений в вакууме. Выбор клотримазола ( $C_{22}H_{17}ClN_2$ ) в качестве лечебного препарата обусловлен его высокими антибактериальными и противомикробными свойствами и, так как он практически не растворим, формирование покрытий на его основе из активной газовой фазы является обоснованным.

### 1 Методика проведения эксперимента

Покрытия осаждали из потока летучих продуктов электронно-лучевого диспергирования соединений в соответствии с методикой, приведенной в [9]. Плотность потока электронов составляла  $j = (0,01-0,03) \text{ А/см}^2$ , энергия  $E$  до 1600 эВ. Формирование покрытий осуществляли при достижении в вакуумной камере давления остаточных газов  $\approx 4 \cdot 10^{-3}$  Па. Лекарственное вещество смешивалось с порошками ПУ, ПУ<sub>2</sub>, ПВХ и ПВХ<sub>2</sub>. Порошки ПУ<sub>2</sub> и ПВХ<sub>2</sub> получали путем предварительного электронно-лучевого диспергирования полимера по методике, представленной в работе [10]. Покрытие на основе ПВХ<sub>2</sub> содержит преимущественно графитоподобные структуры и полиеновые фрагменты, имеет регулярные поры размером 300–700 нм, обладает высокой стойкостью к истиранию, что определяет его эффективное применение в качестве матрицы подложки (носителя) для антибактериальных слоев [9].

Толщина покрытий контролировалась непосредственно в процессе нанесения с помощью кварцевого измерителя. Сравнительному анализу подвергаются покрытия только с одинаковой эффективной толщиной.

В качестве материала подложек при проведении ИК исследований использованы пластины NaCl, кремниевые пластины – при проведении рентгенофотонной спектроскопии (РФЭС), титановые пластины – при микробиологических исследованиях.

Химический состав осажденных покрытий определяли методом РФЭС. Измерения проводили на спектрометре PHI Quantera II Scanning XPS Microprobe, используя Al K $\alpha$  в качестве источника монохроматического рентгеновского излучения ( $h\nu = 1486,6$  эВ). Калибровку прибора осуществляли по линии C1s с энергией связи 284,6 эВ. Обработка полученных результатов осуществлялась с помощью математического приложения OriginPro.

ИК спектроскопические исследования выполнялись на ИК-Фурье спектрофотометре Vertex-70 (Bruker) с использованием стандартной

ячейки на пропускание. Спектры регистрировались в диапазоне волновых чисел  $4000 - 400 \text{ см}^{-1}$  с разрешением  $4 \text{ см}^{-1}$ .

ЯМР  $^1\text{H}$  спектры исходных лекарственных соединений и покрытий получали с использованием спектрометра Bruker Avance 400 МГц.

Оценка противогрибковой активности покрытий проводилась стандартным диск-диффузионным методом. Для этого суточную культуру гриба *Candida albicans* ATCC 10231 в концентрации  $10^4$  КОЕ развели до  $10^{-2}$ , что соответствует микробной нагрузке 100 грибных тел в мл, объем пробы 100 мкл, засекали сплошным газонном на поверхность плотной питательной среды для культивирования грибов (агар Сабуро 4%-декстрозный). Затем помещали диски с покрытиями на основе клотримазола. Контрольный образец представлял собой образец покрытия без лекарственного соединения. Чашки Петри, содержащие диски, инкубировали в термостате при  $(35 \pm 1)^\circ \text{C}$  на протяжении 48 ч. О наличии противогрибковой активности (качественная реакция) судили по образованию вокруг дисков зон задержки роста тест-штамма. При определении степени выраженности активности принимали во внимание размер зоны отсутствия роста колоний, полное/неполное ингибирование роста колоний, прорастание колоний на поверхности диска, по периметру диска и иные обстоятельства.

## 2 Результаты и их обсуждение

Установлено, что в ИК-спектре покрытия на основе клотримазола присутствуют все полосы поглощения, характерные для порошка исходного лекарственного соединения (рисунок 2.1). Отличия спектров проявляются в изменении положения отдельных полос поглощения и значений их оптической плотности. Подобные изменения могут быть обусловлены различным физическим состоянием рассматриваемых соединений и, соответственно, различной степенью реализации межмолекулярного взаимодействия в тонком слое и порошке [10].

В ИК спектре покрытия полоса при  $750 \text{ см}^{-1}$  характеризуется наибольшим значением оптической плотности. Отмеченную полосу связывают с внеплоскостными деформационными колебаниями СН в *орто*-дизамещенных ароматических соединениях. Полосы при  $710$  и  $700 \text{ см}^{-1}$  характерны для внеплоскостных деформационных колебаний СН монозамещенных бензола. Интерес представляет сравнительный анализ полос поглощения, располагаемых в области высоких и низких значений волновых чисел ИК-спектра. В области  $3200 - 3000 \text{ см}^{-1}$  ИК-спектра покрытия присутствуют слабо выраженные полосы при  $3030$ ,  $3060$  и  $3087 \text{ см}^{-1}$ . Известно, что валентные колебания  $\text{C} - \text{H}$  ароматических соединений дают полосы поглощения (обычно триплет) при  $3030 \text{ см}^{-1}$ .

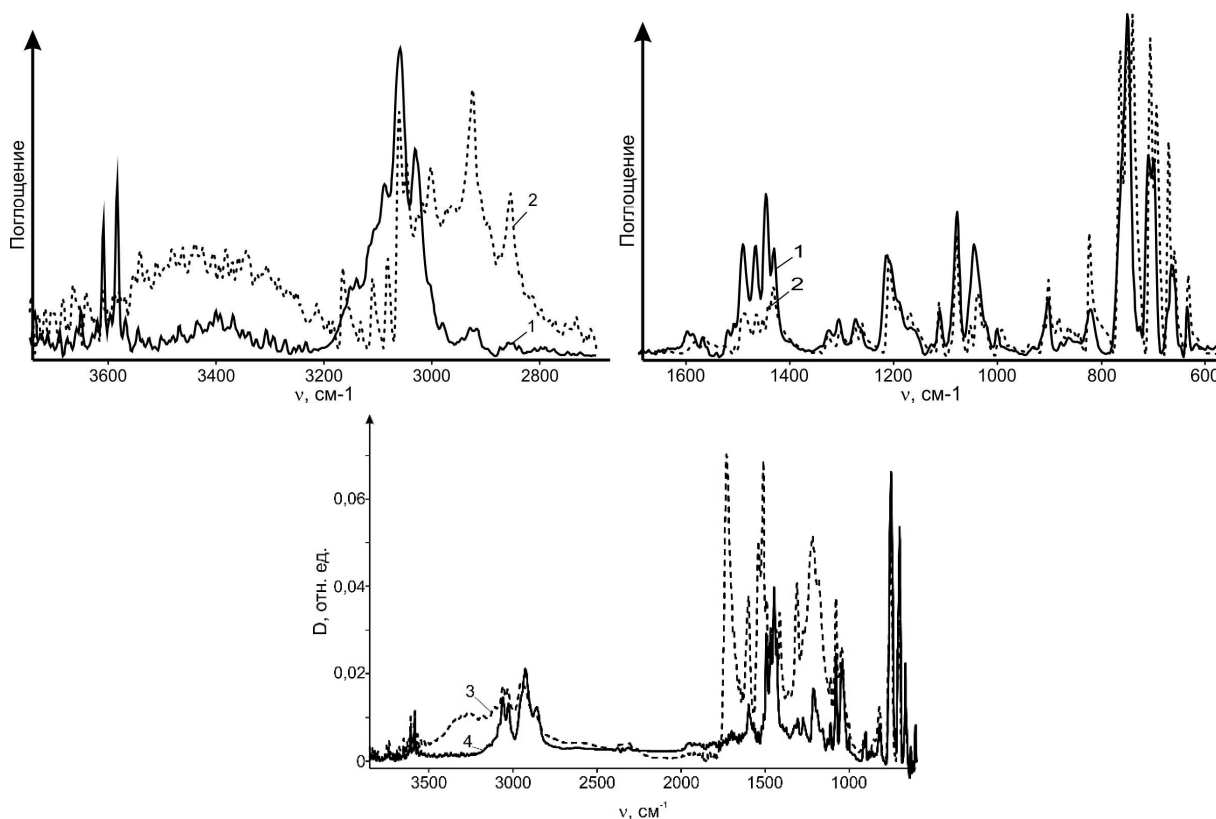


Рисунок 2.1 – ИК-спектры покрытий на основе клотримазола и порошка исходного лекарственного соединения: 1 – покрытие клотримазола; 2 – порошок клотримазола; 3 – покрытие  $\text{PU}_2^+$  клотримазол; 4 – покрытие  $\text{PBX}_2$  + клотримазол

Изменения в агрегатном состоянии анализируемого вещества, присутствие заместителей, в частности галогенов, оказывают заметное влияние на расположение полос, вызывая ее смещение на  $10\text{--}15\text{ см}^{-1}$  в область больших значений волновых чисел [10].

Таким образом, ИК-спектроскопический анализ однозначно указывает на присутствие в структуре молекул сконденсированного соединения как моно-, так и 1,2-дизамещенных бензола. Присутствие атомов хлора в структуре осаждаемого слоя также не ставится под сомнение. При этом ИК-спектроскопия не позволяет оценить степень возможной деструкции C–Cl связей. Согласно полученным данным, в молекулярной структуре осаждаемого покрытия отсутствуют продукты разрушения имидазольного кольца. Подобное привело бы к появлению заметного поглощения в области валентных колебаний NH ( $3500\text{--}3300\text{ см}^{-1}$ ) и CH ( $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ ) связей. Отмеченные изменения в ИК-спектре покрытия на основе клотримазола отсутствуют.

ИК-спектр покрытия на основе клотримазола и ПВХ<sub>2</sub> представлен всеми полосами поглощения, характерными для однокомпонентных слоев. Компоненты композиционного слоя не оказывают заметного влияния на расположение полос поглощения в ИК-спектре. Подобное может быть следствием отсутствия межмолекулярного взаимодействия между компонентами различной природы в композиционном покрытии. Таким образом, композиционное покрытие представляет высокодисперсную механическую смесь исходных компонентов мишени. Анализ ИК-спектра покрытия на основе клотримазола и ПУ<sub>2</sub> затруднен наличием интенсивных полос поглощения, относящихся к фрагментам полиуретана. При этом очевидно, что в структуре сформированного композиционного слоя присутствуют оба компонента исходной мишени.

Результаты ЯМР исследований также указывают на соответствие химического состава молекул, формирующих покрытие, химическому составу исходных молекул клотримазола (рисунок 2.2).

Данный вывод в целом подтверждается также результатами исследования химического состава и структуры методом РФЭС (таблица 2.1 и рисунок 2.3). При этом следует отметить, что в осажденном слое на основе клотримазола фиксируется снижение содержания атомов азота и хлора (таблица 2.1). При этом их относительное содержание в исходном соединении и покрытии практически не изменилось.

На рисунке 2.3 представлены РФЭС спектры покрытий на основе клотримазола. Анализ спектров затруднен из-за отсутствия в литературе результатов подобных исследований. Полосу Cl1s раскладывали на составляющие отдельные пики. Пики при  $(282,6 \pm 0,1)\text{ эВ}$ ,  $(283,5 \pm 0,1)\text{ эВ}$  и

$(284,5 \pm 0,1)\text{ эВ}$  характерны для бензола [11]. Полосу при  $(285,6 \pm 0,2)\text{ эВ}$  соотносят с колебаниями связей C–C/C–N [12], при  $(289,5 \pm 0,1)\text{ эВ}$  – C–Cl связей [13]. Полоса N1s также раскладывалась на составляющие пики:  $395,5\text{ – N–H}$  [14],  $(396,7 \pm 0,1)\text{ эВ}$  (=N–) [15],  $(398,5 \pm 0,2)\text{ эВ}$  (C=N–C) [16],  $(399,9 \pm 0,2)\text{ эВ}$  (N–(C)<sub>3</sub>) [17],  $405\text{ эВ – C–NO}_2/\text{C–ONO}/\text{NO}^-$  [18]. Для покрытий на основе клотримазола установлено некоторое повышение концентрации C=C связей (уменьшение отношение связей C–C/C=C), снижение числа атомов углерода с  $sp^2$  гибридизацией.

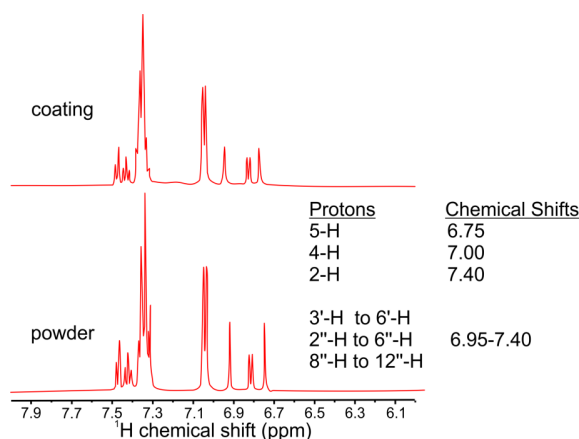


Рисунок 2.2 – ЯМР спектры исходного порошка и покрытия клотримазола

Таблица 2.1 – Элементный состав материалов

Исследуемый материал	ат. %		
	C	N	Cl
Порошок клотримазола	88	8,6	3,4
Покрытие клотримазола	90,5	6,7	2,8
Покрытие клотримазол + ПУ	93,1	6,5	0,4
Покрытие клотримазол + ПВХ	96,8	2,0	1,2

Анализ полученных спектров свидетельствует об отсутствии в покрытии на основе клотримазола продуктов деструкции бензольных колец. Воздействие потока низкоэнергетических электронов не сопровождается заметными изменениями молекулярной структуры клотримазола. В наибольшей степени деструкции подвержены C–Cl связи и имидазольные кольца. Отмечается также повышение относительного содержания ненасыщенных углеродных связей, снижение числа атомов с  $sp^2$  гибридизацией.

Следует отметить, что анализ представленных данных для композиционных слоев не является достаточно корректным, так как данным методом анализируются поверхностные слои и поэтому необходимо учитывать нестационарность процесса диспергирования отдельных компонент композиционной мишени, более высокую скорость диспергирования клотримазола и снижение его содержания в поверхностном слое на заключительных стадиях нанесения покрытия.

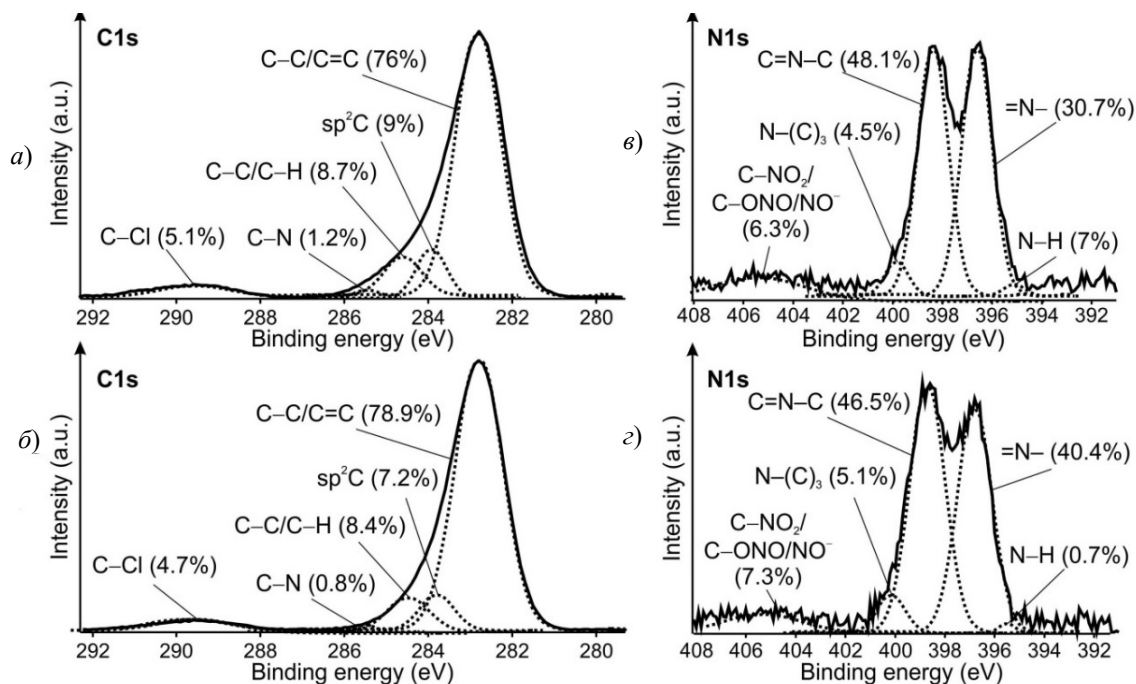


Рисунок 2.3 – РФЭ-спектры материалов на основе клотримазола:

- а) порошок клотримазола; б) покрытие на основе клотримазола;  
 в) покрытие на основе ПВХ<sub>2</sub> и клотримазола; з) покрытие на основе ПУ<sub>2</sub> и клотримазола

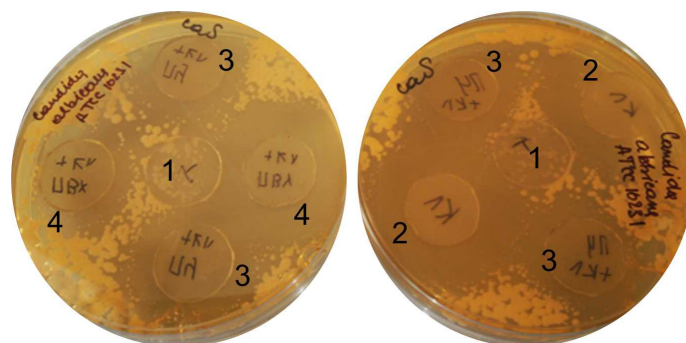


Рисунок 2.4 – Фунгицидная активность образцов в отношении *Candida albicans* ATCC 10231 in vitro (качественная реакция): 1 – контрольный образец (без покрытия); 2 – покрытие на основе клотримазола; 3 – покрытие на основе ПУ<sub>2</sub> и клотримазола; 4 – покрытие на основе ПВХ<sub>2</sub> и клотримазола

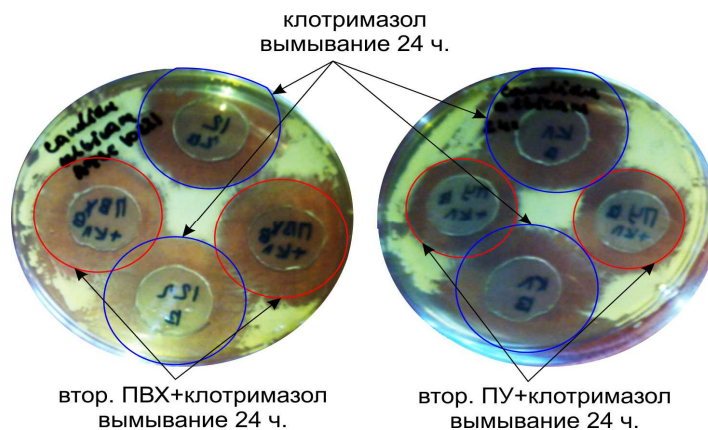


Рисунок 2.5 – Зоны подавления роста *Candida albicans* ATCC 10231 после вымывания в дистиллированной воде



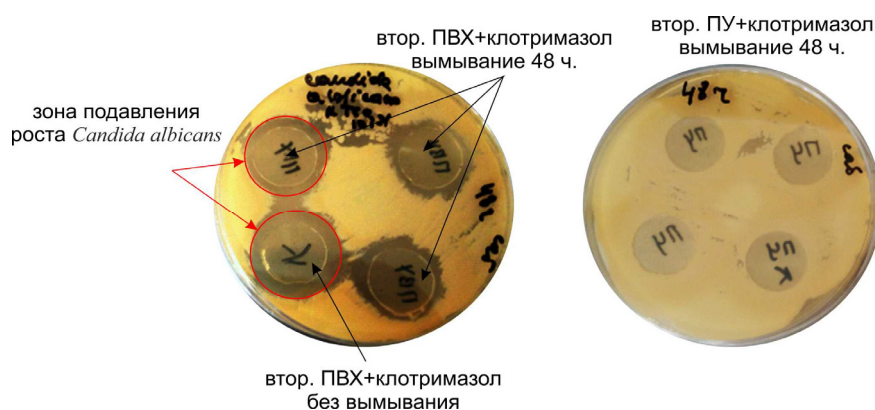


Рисунок 2.6 – Фунгицидная активность образцов в отношении *Candida albicans* ATCC 10231 после 48 ч вымывания

Проведенные микробиологические исследования показали, что полученные композиционные покрытия проявляют противогрибковую активность в отношении тест-штамма (рисунок 2.4).

Вблизи образцов с композиционными покрытиями фиксировалось появление зон отсутствия роста грибка. Результаты многочисленных тест-исследований позволили установить более выраженное фунгицидное действие на *Candida albicans* образцов с покрытием на основе ПВХ<sub>2</sub> и клотримазола.

Выдержка образцов с нанесенными покрытиями в дистиллированной воде в течение 24 ч не сопровождается потерей антифунгальной активности. Диаметры зон подавления роста грибка составляют (30–32) мм, (35–38) мм и (35–40) мм для образцов с покрытиями ПУ<sub>2</sub> + клотримазол, ПВХ<sub>2</sub> + клотримазол и клотримазол, соответственно (рисунок 2.5).

Более длительное пребывание образцов в воде сопровождается снижением их антифунгальной активности. После нахождения в водной среде более 32 ч образцы с нанесенными слоями клотримазола и ПУ<sub>2</sub> + клотримазол полностью теряют свою активность в отношении *Candida albicans*. Фунгицидная активность сохраняется лишь для образца на основе ПВХ<sub>2</sub> + клотримазол. Для данного образца диаметр зоны подавления роста грибка после 48 ч нахождения в воде составлял (24–26) мм (рисунок 2.6).

Образцы с покрытием ПУ<sub>2</sub> + клотримазол после 48 ч нахождения в воде не подвергаются разрушению. Но при этом полностью теряется его антифунгальная активность в отличие от покрытия на основе ПВХ<sub>2</sub> + клотримазол. Причиной потери антифунгальной активности слоя на основе ПВХ + клотримазол может являться быстрое растворение лекарственного соединения. При использовании в качестве матрицы слоя на основе ПВХ<sub>2</sub> за счет его более высокой сорбционной активности реализуется высокое взаимодействие молекулами клотримазола и, как

следствие этого, сохранение высокой антифунгальной активности покрытия при вымывании.

### Заключение

Установлено, что химический состав покрытия, сформированного в результате воздействия потока низкоэнергетических электронов на порошок клотримазола, практически полностью соответствует химическому составу исходного лекарственного соединения. Для покрытия характерно меньшее содержание хлора в сравнении с исходным лекарственным соединением, что объясняется частичной деструкцией С–С1 связей под действием потока электронов. Установлено также повышение в покрытии относительного содержания ненасыщенных углеродных связей, снижения числа атомов с sp<sup>2</sup> гибридизацией.

Установлена высокая эффективность регулирования пролонгированного высвобождения лекарственного соединения путем формирования композиционных покрытий. Показано, что фунгицидная активность композиционных покрытий в значительной степени определяется свойствами полимерной матрицы. Более высокую активность проявляют покрытия на основе клотримазола и повергнутого графитизации ПВХ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Current and novel diagnostics for orthopedic implant biofilm infections: a review* / D. Ronin [et al.] // APMIS. – 2022. – Vol. 130 (2). – P. 59–81.
2. *Serbanescu, M.A. Role of Resident Microbial Communities in Biofilm-Related Implant Infections: Recent Insights and Implications* / M.A. Serbanescu, C.G. Apple, J.S. Fernandez-Moure // Surg Infect (Larchmt). – 2023. – Vol. 24 (3). – P. 258–264.
3. *Meier, E.L. Surface design strategies of polymeric biomedical implants for antibacterial properties* / E.L. Meier, Y. Jang // Current Opinion in Biomedical Engineering. – 2023. – Vol. 26. – 100448.

4. *Phage and Antibiotic Combinations Reduce Staphylococcus aureus in Static and Dynamic Biofilms Grown on an Implant Material* / H. Joo [et al.] // *Viruses*. – 2023. – Vol. 15 (2). – P. 460.
5. *Antimicrobial peptides, conventional antibiotics, and their synergistic utility for the treatment of drug-resistant infections* / Y. Zhu [ et al.] // *Med. Res. Rev.* – 2022. – Vol. 42 (4). – P. 1377 – 1422.
6. *Перспективы синтеза функциональных биоматериалов из активной газовой фазы* / А.В. Рогачев [и др.] // *Полимерные материалы и технологии*. – 2023. – Т. 9 (4). – С. 97–104.
7. *Nanocomposite multifunctional polyelectrolyte thin films with copper nanoparticles as the antimicrobial coatings* / T. Kruk [ et al.] // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. – 2019. – Vol. 181. – P. 112–118.
8. *Biomimetic multilayer coatings deliver gentamicin and reduce implant-related osteomyelitis in rats* / S. Grohmann [et al.] // *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*. – 2018. – Vol. 15. – P. 1–13.
9. *Микро- и нанокпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы* / М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, П.А. Лучников, А.В. Рогачев, Джанг Сянь Хун. – Москва: Радиотехника, 2016. – 424 с.
10. *Synthesis and structure of antibacterial coatings formed by electron-beam dispersion of polyvinyl chloride in vacuum* / Chun He [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 354. – P. 38–45.
11. *Liu, A.C.* The structure and reactivity of chemisorbed aromatics: Spectroscopic studies of benzene on Mo (110) / A.C. Liu, C.M. Friend // *The Journal of Chemical Physics*. – 1988. – Vol. 89. – P. 4398 – 4405.
12. *Photocatalytic removal using g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> quantum dots / Bi<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> composites* / T. Wang [et al.] // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2019. – Vol. 213. – P. 19–27.
13. *Foelske-Schmitz, A.* Quasi in situ XPS study of electrochemical oxidation and reduction of highly oriented pyrolytic graphite in [1-ethyl-3-methylimidazolium] [BF<sub>4</sub>] electrolytes / A. Foelske-Schmitz, D. Weingarh, R. Kotz // *Electrochimica Acta*. – 2011. – Vol. 56. – P. 10321 – 10331.
14. *Structure and antibacterial activity of PLA-based biodegradable nanocomposite coatings by electron beam deposition from active gas phase* / Chun He [et al.] // *Progress in Organic Coating*. – 2018. – Vol. 123. – P. 282–291.
15. *Synthesis and structure of antibacterial coatings formed by electron-beam dispersion of polyvinyl chloride in vacuum* / Chun He [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – Vol. 354. – P. 38–45.
16. *Biological oxidative mechanisms for degradation of poly (lactic acid) blended with thermoplastic starch* / C.A. Rodrigues [et al.] // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. – 2015. – Vol. 3. – P. 2756–2766.
17. *Electrical, mechanical and thermal properties of aligned silver nanowire / polylactide nanocomposite films* / D. Doganay [et al.] // *Composites Part B: Engineering*. – 2016. – Vol. 99. – P. 288–296.
18. *Facile synthesis of polysilsesquioxane toward durable superhydrophilic / superhydrophobic coatings for medical devices* / S. Park [et al.] // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2019. – Vol. 25. – P. 97–104.
- Работа выполнена в рамках выполнения НИР 21-23 «Плазмохимический синтез, изучение структуры и свойств магнийсодержащих антибактериальных, обладающих высокой остеокондуктивностью покрытий на основе полимеров», задания «Плазмохимическое осаждение и конструкция покрытий с пролонгированным освобождением лекарственных препаратов и их применение для лечения костных повреждений» по договору с БРФФИ №X22КИТГ-024 и проекта № 2022YFE0196800 Национального фонда естественных наук Китая Министерства науки и технологий КНР.*

Поступила в редакцию 09.01.2024.

#### Информация об авторах

Ярмоленко Максим Анатольевич – д.т.н., доцент  
Цзян Сяо Хун – доктор наук, профессор  
Рогачёв Александр Александрович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., профессор  
Рогачёв Александр Владимирович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.м., профессор  
Руденков Александр Сергеевич – к.т.н., доцент  
Ярмоленко Ольга Альфредовна – старший преподаватель  
Фролов Сергей Анатольевич – стажер мл.н.с.