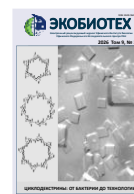




ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>



УДК 541.64:539.2+620.22:54:6



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ | RESEARCH ARTICLE

КОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ ВОДРАСТВОРИМОГО ПОЛИУРЕТАНА, БРИЛЛИАНТОВОГО ЗЕЛЁНОГО И ПРОИЗВОДНЫХ β -ЦИКЛОДЕКСТРИНА

Лобова Н.А.^{1,2*}, Александрова А.В.¹,
Святославская Т.А.¹, Святославский Н.Л.¹,
Венидиктова О.В.¹

¹ НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

² Московский Физико-технический Институт (Национальный
исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

*E-mail: lobova_n_a@mail.ru

A COMPOSITE MATERIAL BASED ON WATER SOLUBLE POLYURETHANE, BRILLIANT GREEN AND β -CYCLODEXTRIN DERIVATIVES

Lobova N.A.^{1,2*}, Aleksandrova A.V.¹,
Svyatoslavskaya T.A.¹, Svyatoslavskiy N.L.¹,
Venidiktova O.V.¹

¹ NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology,
Dolgoprudny, Russia

*E-mail: lobova_n_a@mail.ru

Аннотация

Одним из направлений современной медицины является разработка местно применяемых (топических) композитных материалов, содержащих в своём составе соединения различной химической природы, обладающие ранозаживляющими свойствами или способные проникать в глубокие слои кожи. В этой парадигме впервые исследован композитный материал на основе водорастворимого полиуретана и производных циклодекстринов как потенциально перспективный материал для трансдермальной доставки, представляющий собой смешанный макро-микро-пористый носитель, содержащий краситель бриллиантовый зелёный. Методом спектрофотометрического титрования оценены константы комплексообразования краситель-циклодекстрин (lgK 1:1 до 5.0). Методом электронной спектроскопии оценена кинетика накопления красителя и его супрамолекулярных комплексов в материале. Методом атомно-силовой микроскопии оценена пористость материала. Показано, что введение в полимерную матрицу водорастворимого полиуретана гидроксипропил- β -циклодекстрина, имеющего сродство к полимеру, увеличивает относительную сорбционную ёмкость композитного материала в 1.4 раза. Смешанные макро-микро-пористые носители могут оказаться перспективными для допирования их наноразмерными объектами.

Ключевые слова:

водорастворимый полиуретан, биологически-активные вещества, кавитанды, супрамолекулярный комплекс, спектрофотометрия, АСМ, пористость

Abstract

One of the areas of modern medicine is the development of locally applied (topical) composite materials containing compounds of various chemical nature that have healing or penetrating properties in deep layers of the skin. In this paradigm, a composite material based on water-soluble polyurethane and derivatives of cyclodextrin were first investigated for transdermal application. This material is a mixed macro-microporous carrier containing brilliant green dye. Spectrophotometric titration was used to estimate the dye-cyclodextrin complexation constants (lgK 1:1 up to 5.0). Electron spectroscopy was used to evaluate the kinetics of the dye and the accumulation of the supramolecular complex in the material. Atomic force microscopy was used to evaluate the porosity of the material. Introducing hydroxypropyl- β -cyclodextrin, a water-soluble polyurethane with polymer affinity, into the polymer matrix increases the relative sorption capacity of the composite material by 1.4-fold. Mixed macro-microporous carriers may be of promise for doping with nanoscale objects.

Keywords:

water-soluble polyurethane, biologically active substances, cavitands, supramolecular complex

Поступила в редакцию: 16.08.2026

Принято в печать: 22.09.2026

Received: 16.08.2026

Accepted: 22.09.2026

Цитировать | Cite as

DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-33> EDN: <https://www.elibrary.ru/xkcebm>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в современной медицине является создание «умных» материалов для трансдермальной доставки лекарственных препаратов. Подобные системы позволяют избежать последовательных кислотного и щелочного катализа, характерных для превращений в желудочно-кишечном тракте, а также метаболизма в печени или почках, несущих риски токсического воздействия на организм [He *et al.* 2023]. В последнее время рынок медицинских изделий завоёвывают различные виды пластырей, носимых на поверхности кожного покрова или закрывающих поверхность раны в виде скаффолда [Lebedeva *et al.* 2024]. Считается, что нательный пластырь может обеспечить дозовый, временной и пространственный контроль доставки терапевтических агентов, в связи с этим разработка новых покрытий для носимых пластырей является актуальной задачей.

Для пластырей активно применяются полимерные материалы, в частности, полиуретаны, которые способны включать в себя фото- и термочувствительные соединения, сохраняя их свойства [Venkatraman *et al.* 2003; Грачёв *и др.* 2022]. Такие материалы отвечают требованиям, предъявляемым к биомедицинским материалам по безопасности [Karpov *et al.* 2026], инертности и утилизации [Fan *et al.* 2023]. В нашем случае в качестве перспективной основы был выбран водорастворимый полиуретан (WSPU), обладающий хорошей адгезией к покрытиям различных типов [Грачёв *и др.* 2022].

В качестве биологически-активного вещества – лекарственного «наполнителя» WSPU использовали краситель бриллиантовый зелёный (BG), обладающий подтверждённой бактериостатической активностью, способный быть извлечённым из растворов при помощи модифицированных полиуретанов [Kong *et al.* 2016] и разрешённый к использованию в качестве лекарственного средства [Министерство здравоохранения РФ 2023]. BG также хорош тем, что обладает люминесценцией, попадающей в так называемое «окно прозрачности биотканей» от 650 до 1000 нм (излучение данного диапазона обладает большей проникающей способностью в биоткани, чем излучение видимого спектра). В медицинских источниках описаны случаи местной лекарственной аллергии на бриллиантовый зелёный, проявляющиеся в виде аллергического контактного дерматита, вызванного индивидуальной гиперчувствительностью к анилиновым красителям. Мы предположили, что дозированное извлечение красителя из полимерного материала может уменьшить топическую нагрузку и снизить проявления воспалительных процессов [Хлудова *и др.* 2019].

В качестве агентов, увеличивающих растворимость биологически-активных веществ и, следовательно, трансдермальное проникновение [Nicolaescu *et al.* 2025], могут быть использованы производные циклодекстринов, применяющиеся также для обратного процесса - извлечения органических компонентов из водных сред [Syeda *et al.* 2022]. Целью нашей работы было воспользоваться супрамолекулярной методологией и создать новый композитный материал на основе WSPU с использованием β -циклодекстрина (β -CD) и гидроксипропил- β -циклодекстрина (HP- β -CD) [Jessie Lue, Peng 2003] в качестве моделей пор заранее известного объёма [Wang *et al.* 2019], а также комплексы с циклодекстринами как отдельные лекарственные субъединицы, способные проникать из материала-носителя в биологические объекты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Реактивы: β -циклодекстрин (Sigma-Aldrich), гидроксипропил- β -циклодекстрин (Sigma-Aldrich), бриллиантовый зелёный (Sigma-Aldrich) и растворители: этанол (Merck), H_2O (Honeywell) были использованы без дополнительной очистки.

Образцы полимера WSPU (25 мг сухого вещества на 100 мг водной дисперсии) были предоставлены ФИЦ ПХФ и МХ РАН. Представленные образцы WSPU являются изофорондиизоцианат-замещёнными, что улучшает физико-механические свойства полимерного материала и его светостойкость.

Стеклянные подложки для нанесения WSPU очищались и гидрофилизировались воздействием холодной высокочастотной плазмы на установке плазменной очистки PDC-001-HP (Harrick Plasma) при натекании воздуха в течение 30 минут.

Нанесение алиquot 5% водного раствора WSPU объёмом 200 мкл на стеклянные подложки производилось методом полива с последующим высушиванием на горизонтальной поверхности в обеспыленном боксе.

Получение композитного материала проводилось путём сорбции красителя в слой полимера при комнатной температуре последовательным выдерживанием подложек с нанесённым WSPU в растворах с концентрацией 2×10^{-4} М (для BG), и 4×10^{-4} М (для циклодекстринов) в течение определённого временного интервала.

Исследования методами электронной спектроскопии и спектрофотометрическое титрование проводили с использованием спектрофотометра Cary 4000 (Agilent) в кварцевых кюветках ($l = 1$ см) в смесях H_2O (Honeywell) и этанола (Merck) при комнатной температуре с шагом 1 нм. Концентрацию BG поддерживали постоянной на уровне 2×10^{-5} М, концентрацию CD изменяли от 0 до 4×10^{-4} М. Последовательное наращивание концентрации титранта производили градиентным добавлением алиquot титрующей смеси (раствор CD + BG) к раствору титруемого красителя. Запись спектров поглощения производили после каждой добавки.

АСМ-исследования проводили в полуконтактном режиме на приборе «Solver P47» (ЗАО «NT-MDT», г. Зеленоград, Россия) на воздухе с использованием отечественных Si кантилеверов (ЗАО «NT-MDT»). В качестве подложек использовали поверхности свежего скола слюды. Исследуемыми образцами служили плёнки WSPU, допированные BG, циклодекстринами или их супрамолекулярными комплексами.

Статистическая обработка данных (вычисление значений констант и погрешностей определения) использовалась как встроенная опция программы HypSpec расчётного пакета HyperQuad [Gans *et al.* 1996]. Достоверность результатов и устойчивость расчётных алгоритмов подтверждались сходимостью рядов при выполнении вычислений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известно [Ben Jannet *et al.* 2026], что каркасные молекулы – производные циклодекстринов – способны образовывать с молекулами-«гостями» комплексы инклюзионного или эксклюзионного типа. Мы предположили, что вследствие стерически-разветвлённой геометрии BG он также будет образовывать комплексы преимущественно эксклюзионного типа (такие, в которых молекула-«гость» скоординирована по порталу или погружена в полость молекулы-«хозяина» только частично).

Комплексообразование между BG и производными циклодекстринов изучали с помощью спектрофотометрии (рис. 2) в смеси вода–этанол (1:1, по объёму), которая обеспечивает наилучшую растворимость компонентов. BG демонстрирует интенсивную полосу поглощения в видимой области спектра: $\lambda_{\max} = 633$ нм, $\varepsilon_{\max} = 25000$ М⁻¹·см⁻¹.

Рисунок 1. Структуры молекул: красителя BG (а) и производных циклодекстринов на примере каркаса β -CD (b).

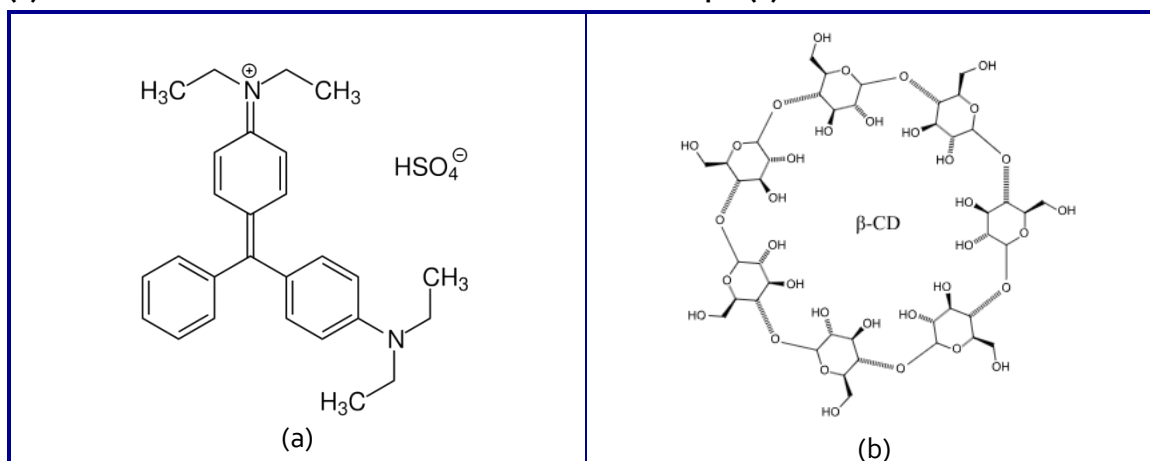
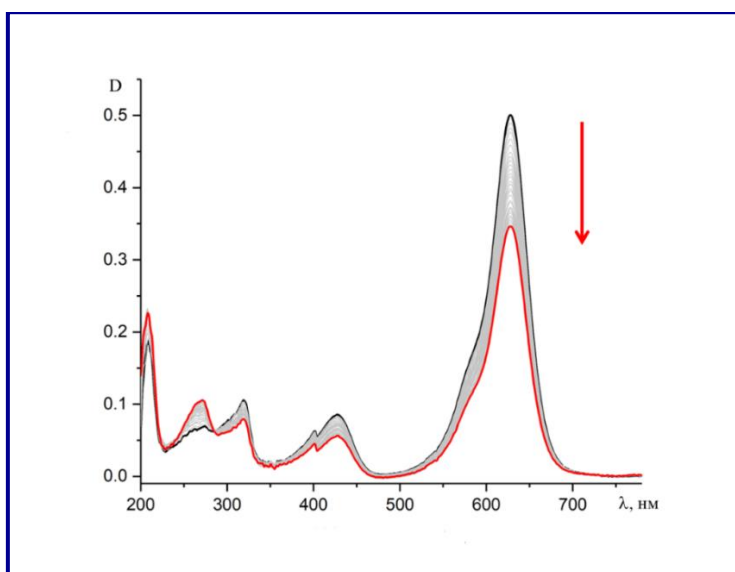


Figure 1. Structures of molecules: BG dye (a) and cyclodextrin derivatives using the β -CD framework as an example (b).

Константы комплексообразования были определены методом спектрофотометрического титрования, расчёт значений констант проводили с помощью программы Hupsres из пакета HyperQuad [Gans *et al.* 1996].

Рисунок 2. Спектрофотометрическое титрование BG ($C_{\text{BG}} = 2 \times 10^{-5} \text{ M}$) раствором β -CD ($C_{\beta\text{-CD}}$ варьировали от 0 до $4.5 \times 10^{-4} \text{ M}$) в смеси вода-этанол (1:1, по объёму).

Figure 2. Spectrophotometric titration of BG ($C_{\text{BG}} = 2 \times 10^{-5} \text{ M}$) with a solution of β -CD ($C_{\beta\text{-CD}}$ varied from 0 to $4.5 \times 10^{-4} \text{ M}$) in a water-ethanol mixture (1:1, v/v).



Константы комплексообразования были определены методом спектрофотометрического титрования, расчёт значений констант проводили с помощью программы Hupsres из пакета HyperQuad [Gans *et al.* 1996].

Зависимость изменений в спектрах поглощения BG от изменения концентрации кавитанда хорошо описывается реакционной моделью, учитывающей одно равновесие (1):



где CAV = β -CD или HP- β -CD. Константы измерены с точностью $\pm 30\%$.

Значения логарифмов констант устойчивости составили $\lg K_{\text{BG} \cdot \beta\text{-CD}} = 4.9$, $\lg K_{\text{BG} \cdot \text{HP-}\beta\text{-CD}} = 5.0$.

Введение BG в полимерную матрицу осуществляли помещением образцов WSPU в водно-этанольные растворы BG с контролем кинетики процесса сорбции. Динамику накопления BG в полимерной матрице WSPU как без циклодекстринов, так и в присутствии молекул-кавитандов

контролировали методом электронной спектроскопии (рис. 3). Изменения имеют выраженное увеличение поглощения в области ДПП, что можно объяснить накоплением красителя и увеличением жёсткости микроокружения красителя.

Рисунок 3. Кинетика накопления бриллиантового зелёного в матрице WSPU по данным спектров поглощения исследуемых плёнок: без циклодекстрина (а); в присутствии HP-β-CD (b).

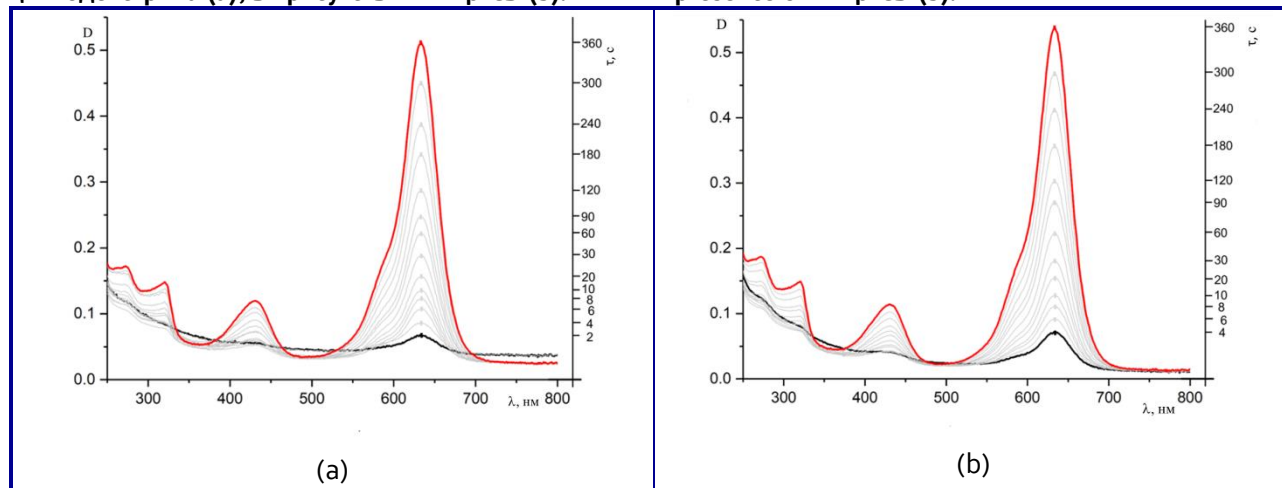


Figure 3. Kinetics of brilliant green accumulation in the WSPU matrix according to the absorption spectra of the studied films: without cyclodextrin (a); in the presence of HP-β-CD (b).

Наилучшая кинетика (рис. 4а) накопления BG в матрице водорастворимого полиуретана наблюдалась для системы WSPU-HP-β-CD-BG в виду большей растворимости HP-β-CD в воде и его большего сродства к полимерной матрице, отмечалось увеличение сорбционной ёмкости материала в 1.4 раза по сравнению с чистым BG. Снижение ёмкости слоя в присутствии β-CD можно отнести на меньшее сродство этого макроцикла и, соответственно, его супрамолекулярного комплекса с красителем к полимеру. Мы предполагаем, что наблюдаемый для WSPU эффект может быть связан с двумя явлениями: 1) необходимостью локальной перестройки полимера в случае диффузии кавитанда (производного CD) в слой полимера и 2) более «мягкой, ветвистой», гибкой структурой порталов гидроксипропил-замещённого, улучшающих взаимодействие с полимером и образование водородных связей.

Рисунок 4. Кинетика накопления в матрице WSPU бриллиантового зелёного и его комплексов с кавитандами (а); образец с сорбированным BG (b).

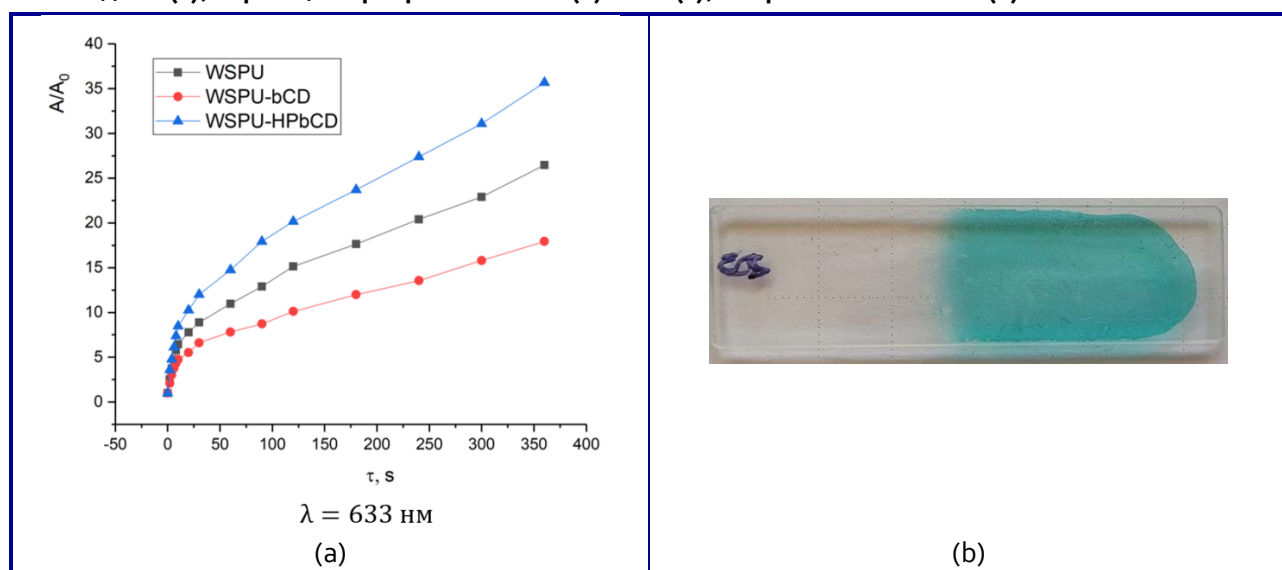


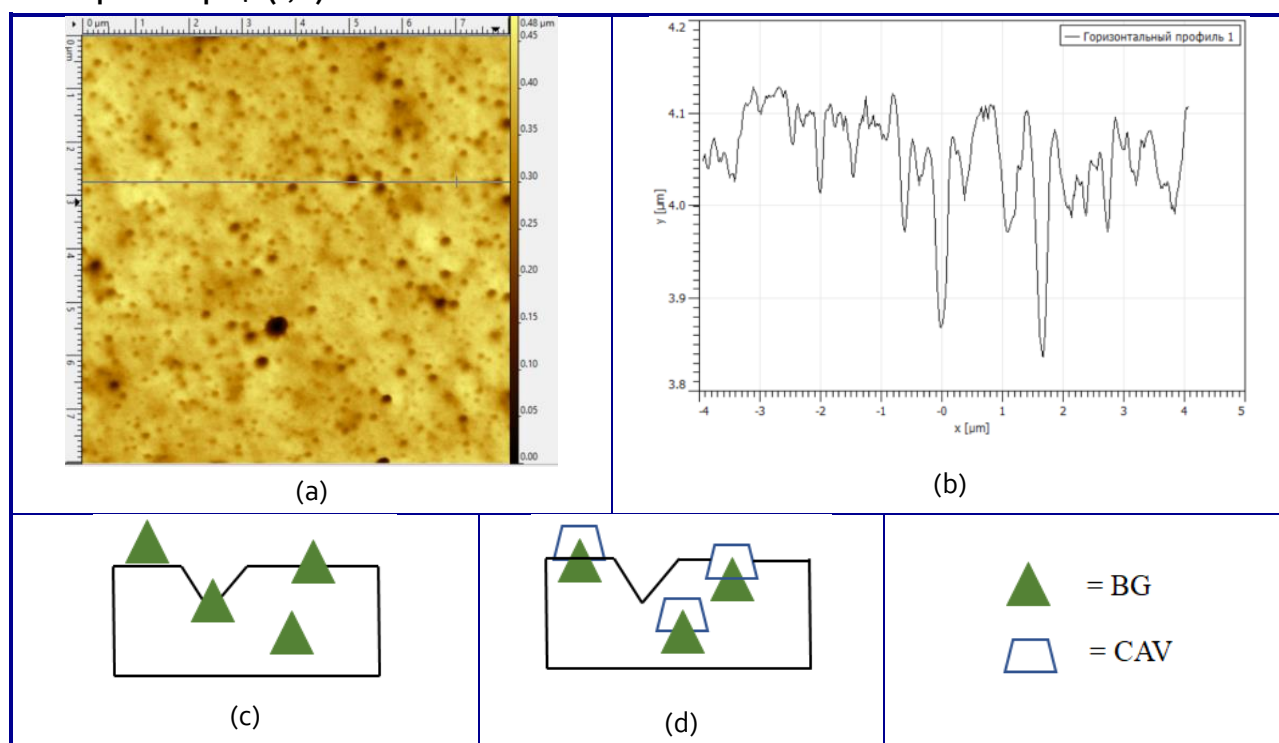
Figure 4. Kinetics of accumulation of brilliant green and its complexes with cavitands in the WSPU matrix (a); sample with sorbed BG (b).

Выдерживание в растворах проводили до 360 с, поскольку при времени экспозиции полимерных плёнок в водных растворах дольше 360 с плёнка WSPU начинала мутнеть, что усложняло спектрофотометрическое измерение сорбированных компонентов. Кинетические кривые накопления красителя и комплексов красителя в полимерной матрице WSPU характерны для сорбции, присущей макропористым адсорбентам.

Структура поверхности плёнок WSPU была оценена методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Было установлено (рис. 5 а,б), что средняя глубина пор полимерной матрицы составляет от 200 до 300 нм с диаметром от 100 до 300 нм. Поверхность плёнок полиуретана является хорошо развитой, что позволяет предложить схему возможной локализации молекул красителя и его комплексов с кавитандами (рис. 5 с,д).

Рисунок 5. Плёнки WSPU, исследованные методом АСМ: структура поверхности (а); профиль поверхности в указанном направлении (б); схематичное изображение возможной локализации молекул BG и комплексов с кавитандами в полимерной матрице (с, д).

Figure 5. WSPU films studied by AFM: surface structure (a); surface profile in the indicated direction (b); schematic representation of the possible localization of BG molecules and complexes with cavitands in the polymer matrix (c, d).



Сорбция красителя и его комплексов с β -CD или HP- β -CD может протекать как на поверхности, так и в объёме водорастворимой полимерной матрицы, поскольку в процессе сорбции из водно-спиртовых растворов может происходить частичное набухание приповерхностных слоёв полимерного носителя и допант (краситель или его комплекс) может продвигаться вглубь слоя. Мы предполагаем, что комплексы BG·CAV сорбируются единым кластером, поскольку, как было показано нами ранее [Novitskii *et al.* 2024], афинность полости циклодекстрина обладает более высоким сродством к sp^2 -гибридизованным молекулярным фрагментам, чем развитая поверхность полимерного материала.

Таким образом, был исследован композитный материал на основе красителя BG, производных циклодекстринов и WSPU. Было показано, что введение в полимерную матрицу HP- β -CD в составе комплекса с красителем увеличивает относительную сорбционную ёмкость

композитного материала, что может быть перспективным для создания трансдермальных терапевтических систем на основе водорастворимого полиуретана.

ВЫВОДЫ

Получен и исследован композитный материал на основе водорастворимого полиуретана и производных циклодекстринов для трансдермальной доставки, представляющий собой смешанный макро-микро-пористый носитель, содержащий краситель бриллиантовый зелёный. Предложена модель расположения допанта в полимерном материале. Методом спектрофотометрического титрования оценены значения констант комплексообразования ($\lg K_{BG-\beta-CD} = 4.9$, $\lg K_{BG-HP-\beta-CD} = 5.0$). Максимальный размер макропор полимерного материала (по результатам АСМ) составляет порядка 300 нм, что открывает возможности для создания композитных материалов, допированных наночастицами. Показано, что введение в полимерную матрицу водорастворимого полиуретана гидроксипропил- β -циклодекстрина за счёт придания структуре полимера микропористости увеличивает его относительную сорбционную ёмкость в 1.4 раза.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Государственного задания НИЦ Курчатовский институт.

БЛАГОДАРНОСТИ

Коллектив авторов выражает благодарность В.П. Грачёву и А.С. Джалмухановой за предоставленные образцы водорастворимого полиуретана.

Конфликт интересов | Conflicts of Interest

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи. The authors declare no actual or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Авторский вклад | Author Contributions

Лобовой Н.А. осуществлялось руководство работой и её администрирование, разработка методологии исследования, написание и правка текста. А.В. Александровой и О.В. Венидиктовой выполнялся основной пул экспериментальных исследований. Измерения на АСМ, расчёты констант комплексообразования и первичное описание оригинальных результатов работы были выполнены Александровой А.В. Т.А. Святославской и Н.Л. Святославским осуществлялись подготовка подложек, поддержка работы программным обеспечением (софт), а также настройка и поддержание в рабочем состоянии приборной базы. N.A. Lobova supervised and administered the work, developed the research methodology, wrote and edited the text. A.V. Alexandrova and O.V. Venidiktova carried out the main pool of experimental research. AFM measurements, calculations of complexation constants and a primary description of the original results of the work were performed by A.V. Alexandrova. T.A. Svyatoslavskaya and N.L. Svyatoslavsky carried out the preparation of the substrates, software support, as well as the configuration and maintenance of the instrument base.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Грачёв В.П., Джалмуханова А.С., Бубнова М.Л., Венидиктова О.В., Барачевский В.А., Павлова А.В., Курочкин С.А. (2022) Полиуретаны – как перспективные матрицы для фотохромных материалов. В: *Технологии и материалы для экстремальных условий: Материалы XVII Всероссийской научной конференции. 11 ноября 2022*. Москва: 137–143.
- Министерство здравоохранения РФ (2023) Бриллиантовый зеленый (ФС.2.1.0008.15). В: *Государственная фармакопея РФ (15 изд.), Т.3*. Министерство здравоохранения РФ. Москва: 3488–3490.
- Хлудова Л.Г., Латышева Т.В., Романова Т.С., Мясникова Т.Н. (2019) Кожные проявления лекарственной аллергии. *Астма и аллергия*. (2): 12–16. EDN: HSEILW
- Ben Jannet D., Kallel J., Chevalier Y., Hbaieb S. (2026) Efficient adsorption of brilliant green using polyaniline pseudopolyrotaxanes included in per-amino- β -cyclodextrin. *Polymer*. **354**: 129976. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2026.129976> EDN: GMPJIWJ
- Fan Y., Song X., Liu L., Zhou C., Wu G. (2023) Dual network interpenetrating degradable waterborne polyurethanes with hydrogen bonded cross-linked modified β -cyclodextrin hydrophobic cavities. *Journal of Applied Polymer Science*. **140**(33): e54298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.54298> EDN: XHLMTL
- Gans P., Sabatini A., Vacca A. (1996) Investigation of equilibria in solution. Determination of equilibrium constants with the HYPERQUAD suite of programs. *Talanta*. **43**(10): 1739–1753. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(96\)01958-3](https://doi.org/10.1016/0039-9140(96)01958-3) EDN: XNFVBL
- He J., Zhang Y., Yu X., Xu C. (2023) Wearable patches for transdermal drug delivery. *Acta Pharmaceutica Sinica B*. **13**(6): 2298–2309. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2023.05.009> EDN: DTHJGN
- Jessie Lue S., Peng S.H. (2003) Polyurethane (PU) membrane preparation with and without hydroxypropyl- β -cyclodextrin and their pervaporation characteristics. *Journal of Membrane Science*. **222**(1–2): 203–217. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00291-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00291-6) EDN: KKIUYH
- Karpov S. V., Polyakova E.A., Tumanov V.A., Dzhal mukhanova A.S., Panin E.O., Mishchenko D. V., Klimanova E.N., Sashenkova T.E., Allayarova U.Yu., Perepelitsina E.O. et al. (2026) Waterborne polyurethanes incorporating trimethyl-beta-cyclodextrin as potential delivery systems for bioactive compounds. *Macromolecular Chemistry and Physics*. **227**(5): e70221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/macp.70221> EDN: RKCOZK
- Kong L., Qiu F., Zhao Z., Zhang X., Zhang T., Pan J., Yang D. (2016) Removal of brilliant green from aqueous solutions based on polyurethane foam adsorbent modified with coal. *Journal of Cleaner Production*. **137**: 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.067> EDN: XZMOYB
- Lebedeva K., Cherkashina A., Masikevych Y., Masikevych A., Voronkin A.A., Lebedev V. (2024) Modeling of smart bio-medical active polymeric hydrogel transdermal materials. *Journal of Engineering Sciences*. **11**(1): C1–C7. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).c1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).c1) EDN: VOUZAT
- Nicolaescu O.E., Belu I., Mocanu A.G., Manda V.C., Rău G., Pîrvu A.S., Ionescu C., Ciulu-Costinescu F., Popescu M., Ciocîlteu M.V. (2025) Cyclodextrins: Enhancing drug delivery, solubility and bioavailability for modern therapeutics. *Pharmaceutics*. **17**(3): 288. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17030288> EDN: EDJZNQ
- Novitskii G.O., Medvedeva A.A., Koshkin A. V., Vedernikov A.I., Lobova N.A. (2024) Spectral properties of tolane and its supramolecular complexes in solution and silicate hydrogel. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. **69**(4): 512–519. <https://doi.org/10.1134/S0036023624600291> EDN: NSOTFC
- Syeda S.E.Z., Nowacka D., Khan M.S., Skwierawska A.M. (2022) Recent advancements in cyclodextrin-based adsorbents for the removal of hazardous pollutants from waters. *Polymers*. **14**(12): 2341. <https://doi.org/10.3390/polym14122341> EDN: OFRRUO
- Venkatraman S.S., Stein T.M., Snider J., Hamlin R.D. (2003) Transdermal drug delivery devices comprising a polyurethane drug reservoir. Patent № EP 1169025 B1.
- Wang Z., Zhang B., Fang C., Liu Z., Fang J., Zhu L. (2019) Macroporous membranes doped with micro-mesoporous β -cyclodextrin polymers for ultrafast removal of organic micropollutants from water. *Carbohydrate Polymers*. **222**: 114970. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.114970>

REFERENCES

- Grachev V.P., Dzhalmukhanova A.S., Bubnova M.L., Venidiktova O.V., Barachevsky V.A., Pavlova A.V., Kurochkin S.A. (2022) Polyurethanes as promising matrices for photochromic materials [Poliuretany – kak perspektivnye matritsy dlya fotokhromnykh materialov]. In: *Technologies and materials for extreme conditions: proceedings of the XVII All-Russian scientific conference*. 11 November 2022. Moscow: 137–143. (in Russian)
- Ministry of Health of the Russian Federation (2023) Brilliant green (FS.2.1.0008.15) [Brilliantovyy zelenyy (FS.2.1.0008.15)]. In: *State Pharmacopoeia of the Russian Federation (15th ed.)*, Vol. 3. Ministry of Health of the Russian Federation Publishing. Moscow: 3488–3490. (in Russian)
- Khludova L.G., Latysheva T.V., Romanova T.S., Myasnikova T.N. (2019) Skin manifestations of drug allergy [Kozhnye proyavleniya lekarstvennoy allergii]. *Asthma and Allergy [Astma i allergiya]*. (2): 12–16. EDN: HSEILW (in Russian)
- Ben Jannet D., Kallel J., Chevalier Y., Hbaieb S. (2026) Efficient adsorption of brilliant green using polyaniline pseudopolyrotaxanes included in per-amino- β -cyclodextrin. *Polymer*. **354**: 129976. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2026.129976> EDN: GMPJWJ
- Fan Y., Song X., Liu L., Zhou C., Wu G. (2023) Dual network interpenetrating degradable waterborne polyurethanes with hydrogen bonded cross-linked modified β -cyclodextrin hydrophobic cavities. *Journal of Applied Polymer Science*. **140**(33): e54298. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.54298> EDN: XHLMTL
- Gans P., Sabatini A., Vacca A. (1996) Investigation of equilibria in solution. Determination of equilibrium constants with the HYPERQUAD suite of programs. *Talanta*. **43**(10): 1739–1753. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(96\)01958-3](https://doi.org/10.1016/0039-9140(96)01958-3) EDN: XNFVBL
- He J., Zhang Y., Yu X., Xu C. (2023) Wearable patches for transdermal drug delivery. *Acta Pharmaceutica Sinica B*. **13**(6): 2298–2309. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2023.05.009> EDN: DTHJGN
- Jessie Lue S., Peng S.H. (2003) Polyurethane (PU) membrane preparation with and without hydroxypropyl- β -cyclodextrin and their pervaporation characteristics. *Journal of Membrane Science*. **222**(1–2): 203–217. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00291-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00291-6) EDN: KKIUYH
- Karpov S. V., Polyakova E.A., Tumanov V.A., Dzhalmukhanova A.S., Panin E.O., Mishchenko D. V., Klimanova E.N., Sashenkova T.E., Allayarova U.Yu., Perepelitsina E.O. et al. (2026) Waterborne polyurethanes incorporating trimethyl-beta-cyclodextrin as potential delivery systems for bioactive compounds. *Macromolecular Chemistry and Physics*. **227**(5): e70221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/macp.70221> EDN: RKCOZK
- Kong L., Qiu F., Zhao Z., Zhang X., Zhang T., Pan J., Yang D. (2016) Removal of brilliant green from aqueous solutions based on polyurethane foam adsorbent modified with coal. *Journal of Cleaner Production*. **137**: 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.067> EDN: XZMOYB
- Lebedeva K., Cherkashina A., Masikevych Y., Masikevych A., Voronkin A.A., Lebedev V. (2024) Modeling of smart bio-medical active polymeric hydrogel transdermal materials. *Journal of Engineering Sciences*. **11**(1): C1–C7. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).c1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).c1) EDN: VOUZAT
- Nicolaescu O.E., Belu I., Mocanu A.G., Manda V.C., Rău G., Pîrvu A.S., Ionescu C., Ciulu-Costinescu F., Popescu M., Ciocîlteu M.V. (2025) Cyclodextrins: Enhancing drug delivery, solubility and bioavailability for modern therapeutics. *Pharmaceutics*. **17**(3): 288. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17030288> EDN: EDJZNO
- Novitskii G.O., Medvedeva A.A., Koshkin A. V., Vedernikov A.I., Lobova N.A. (2024) Spectral properties of tolane and its supramolecular complexes in solution and silicate hydrogel. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. **69**(4): 512–519. <https://doi.org/10.1134/S0036023624600291> EDN: NSOTFC
- Syeda S.E.Z., Nowacka D., Khan M.S., Skwierawska A.M. (2022) Recent advancements in cyclodextrin-based adsorbents for the removal of hazardous pollutants from waters. *Polymers*. **14**(12): 2341. <https://doi.org/10.3390/polym14122341> EDN: OFRRUO
- Venkatraman S.S., Stein T.M., Snider J., Hamlin R.D. (2003) Transdermal drug delivery devices comprising a polyurethane drug reservoir. Patent № EP 1169025 B1.
- Wang Z., Zhang B., Fang C., Liu Z., Fang J., Zhu L. (2019) Macroporous membranes doped with micro-mesoporous β -cyclodextrin polymers for ultrafast removal of organic micropollutants from water. *Carbohydrate Polymers*. **222**: 114970. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.114970>

Цитировать как

Лобова Н.А., Александрова А.В., Святославская Т.А., Святославский Н.Л., Венидиктова О.В. (2026). Композитный материал на основе водорастворимого полиуретана, бриллиантового зелёного и производных β -циклодекстрина. *Экобиотех.* 9(3): 437-446.

DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-33>

EDN: <https://www.elibrary.ru/xkcebm>

Сведения об авторе/ах

Наталья Анатольевна Лобова, к.х.н. НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия. E-mail: lobova_n_a@mail.ru, SPIN: 6459-2147, ORCID: 0000-0002-6347-7258, Scopus Author ID: 7003682729, WoS Research ID: L-3531-2013.

Анастасия Владимировна Александрова (Павлова), аспирант. НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия. E-mail: pavlova0anast@gmail.com, SPIN: 3070-5618, ORCID: 0000-0002-5179-7828, Scopus Author ID: 57221470041, WoS Research ID: AAJ-6826-2021.

Татьяна Александровна Святославская, НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия. E-mail: tasvyat@gmail.com, AuthorID: 117295, Scopus Author ID: 57208917387.

Никита Леасович Святославский, НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия. E-mail: niksvyat@gmail.com, AuthorID: 156027, Scopus Author ID: 57217100981, WoS Research ID: AAG-7346-2021.

Ольга Владимировна Венидиктова, НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия. E-mail: wolga.photonics@inbox.ru, SPIN: 4723-7831, ORCID: 0000-0002-2289-0863, Scopus Author ID: 12769325700, WoS Research ID: J-6169-2018.

Cited as

Lobova N.A., Aleksandrova A.V., Svyatoslavskaya T.A., Svyatoslavskiy N.L., Venidiktova O.V. (2026). A composite material based on water soluble polyurethane, brilliant green and β -cyclodextrin derivatives. *Ecobiotech.* 9(3): 437-446.

DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-33>

EDN: <https://www.elibrary.ru/xkcebm>

Information About the Author(s)

Natalia A. Lobova, PhD in Chemical Sciences, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia. E-mail: lobova_n_a@mail.ru, SPIN: 6459-2147, ORCID: 0000-0002-6347-7258, Scopus Author ID: 7003682729, WoS Research ID: L-3531-2013.

Anastasia V. Aleksandrova (Pavlova), PhD student in Chemical Sciences, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia. E-mail: pavlova0anast@gmail.com, SPIN: 3070-5618, ORCID: 0000-0002-5179-7828, Scopus Author ID: 57221470041, WoS Research ID: AAJ-6826-2021.

Tatiana A. Svyatoslavskaya, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia. E-mail: tasvyat@gmail.com, AuthorID: 117295, Scopus Author ID: 57208917387.

Nikita L. Svyatoslavskiy, NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia. E-mail: niksvyat@gmail.com, AuthorID: 156027, Scopus Author ID: 57217100981, WoS Research ID: AAG-7346-2021.

Olga V. Venidiktova NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia. E-mail: wolga.photonics@inbox.ru, SPIN: 4723-7831, ORCID: 0000-0002-2289-0863, Scopus Author ID: 12769325700, WoS Research ID: J-6169-2018.