

Показано, что антиоксидантная активность хлорофилла при инкапсулировании уменьшается по сравнению с нативной формой и зависит от типа полимерной матрицы (до 0,8 мг-экв/мл для хитозановых и до 0,5 мг-экв/мл для пектинатных частиц). Капсулирование хлорофилла в полимерную матрицу пектина приводит к улучшению фотостабильности красителя (на 3–23%). Кинетика фотоиндуцированного окисления нативного и капсулированного хлорофилла имеет псевдопервый порядок ( $R^2 > 0,94$ ), рассчитаны константы скорости. Полученные результаты могут послужить основой для создания новых функциональных добавок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ  
(договор №X24MH-003).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. WHO. World health statistics 2025: monitoring health for the SDGs, Sustainable Development Goals // Geneva: World Health Organization. – 2025.
2. Ebrahimi P., Shokramraji Z., Tavakkoli S. et al. Chlorophylls as Natural Bioactive Compounds Existing in Food By-Products: A Critical Review. *Plants* (Basel). – 2023. – V. 12(7). – Article 1533.
3. Lee E., Ahn H., Choe E. Effects of light and lipids on chlorophyll degradation. *Food Sci. Biotechnol.* – 2014. – V. 23(4). – P. 1061–1065.
4. Timilsena Y. P., Haque Md. A., Adhikari B. Encapsulation in the Food Industry: A Brief Historical Overview to Recent Developments. *Food Nutr. Sci.* – 2020. – V. 11. – P. 481–508.
5. Yang Z.-S., Song H.-Y., Yang K.-M. et al. The physicochemical properties and the release of sodium caseinate/polysaccharide gum chlorophyll multiple-layer particles by rotary side-spray fluid bed technology. *Food Chem.* – 2022. – V. 394. – Article 133442.

УДК: 601+578.1+579.61+544.72.023

М. А. Белявская, мл. науч. сотр.,  
Е. В. Хаинская, асп., мл. науч. сотр.,  
К. С. Гилевская, вед. науч. сотр., канд. хим. наук  
(ИХНМ НАН Беларуси, г. Минск);  
В. В. Савич, науч. сотр.  
(Институт микробиологии НАН Беларуси, г. Минск)

### **ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА УЛЬТРАТОНКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПЕКТИНА И ЕГО ПРОИЗВОДНЫХ**

В последнее время бактериофаги активно исследуются, поскольку они могут использоваться не только как терапевтические средства, но и как биосенсоры [1]. Фаги нетоксичны для человека и

обладают самоорганизующимися наноструктурами и функциональными свойствами. Создание ультратонких покрытий на основе природных полиэлектролитов, с заданными свойствами (толщина, гидрофильность, плотность заряда, шероховатость) позволит проводить контролируемую иммобилизацию бактериофагов и обеспечит сохранение их литической активности и регулируемое высвобождение, что необходимо для получения высококачественных биомедицинских материалов нового поколения. В то же время сообщается о противовирусном потенциале ультратонких пленок на основе биополимеров [2]. Фундаментальное понимание взаимодействий между вирусами, то есть белками их капсида, и твердыми поверхностями имеет жизненно важное значение для контроля передачи вируса из окружающей среды и разработки эффективных противовирусных стратегий [3].

Цель работы: формирование ультратонких покрытий на основе полианионного полисахарида пектина и его производных, изучение их физико-химических характеристик и адсорбции бактериофагов на их поверхности. В работе использовали подложки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и кремния и следующие полимеры: полистиролсульфонат натрия (ПСС, ММ = 70000, контроль), пектины с различной степенью этерификации и амидирования (Citrus, Classic, Amid с СЭ=71%; 35–42%; СЭ=32%, ММ=120 000, СА=18%), низкоэтерифицированный окисленный пектин (степень окисления ~40%), нанокмозиты пектин-серебро на основе амидированного (Amid25Ag) и низкоэтерифицированного (Classic25Ag) пектинов, функционализированные фенольными кислотами конъюгаты амидированного пектина с галловой (Amid-ГК, СП=19,71±1,09) и феруловой (Amid-ФК, СП=16,91±2,06) кислотами.

Тонкие пленки получали методом послойного осаждения полиэлектролитов (Layer-by-Layer assembly, LbL) из воды и 0,15М раствора NaCl. В качестве сшивающего агента использовали ионы кальция или магния. Для оценки влияния дезинфицирующих средств на сформированные покрытия использовали медицинский антисептический раствор (70% раствор этанола). Морфологию поверхности и шероховатость (Rms) полученных пленок до и после стерилизации этанолом исследовали методом атомно-силовой микроскопии (Nanoscope IIIA, Veeco). Краевой угол смачивания (КУС,  $\Theta$ ) определяли методом лежащей капли. Сформированные на основе пектинов и их производных ультратонкие покрытия на жестких кремниевых и гибких ПЭТФ подложках демонстрируют высокий уровень гидрофильности: значение КУС  $\leq 60$  (рис. 1). Наибольшей лиофильностью характеризуются покрытия на основе немодифицированных пектинов. Обработка их сши-

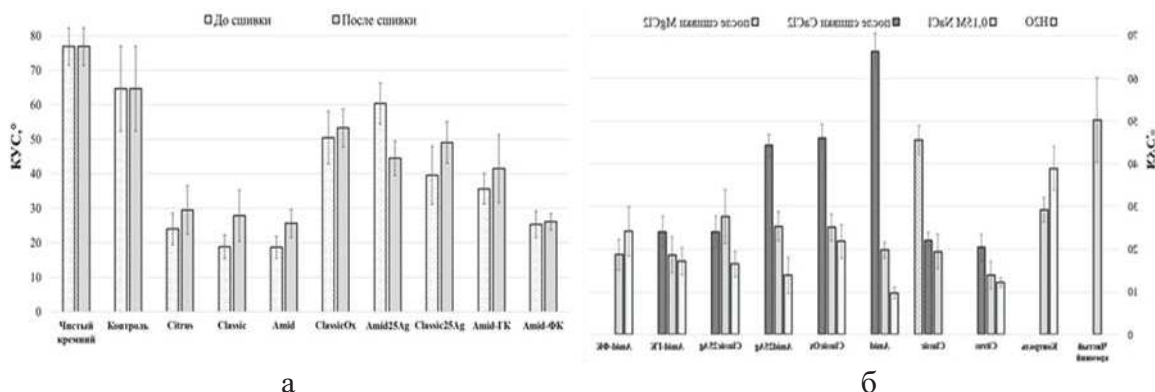
вающими агентами обеспечивает повышение в 2–6 раз значений КУС. Смачиваемость покрытий на основе конъюгатов пектина с фенольными кислотами по сравнению с немодифицированными полимерами в меньшей степени зависит от ионной силы растворов для формирования и практически не изменяется после сшивки ионами кальция. Методом АСМ показано, что сформированные покрытия однородные, гладкие (шероховатость менее 5 нм) и устойчивые к воздействию дезинфицирующего раствора этилового спирта.

Для изучения особенностей взаимодействия бактериофагов с поверхностью модифицированной биополимерами использовали образцы бактериофагов, предоставленные Институтом микробиологии НАН Беларуси: фаг *Aeromonas phage BV-140* (бактерия-хозяин *Aeromonas veronii* БИМ В-2117), фаг *Bacillus phage BV-90 Г* (бактерия-хозяин *Bacillus subtilis* БИМ В985 Г), фаг *Escherichia phage BV-67 Г* (бактерия-хозяин *Escherichia coli* БИМ 379).

Анализ АСМ данных показал, что на поверхностях, модифицированных ультратонкими покрытиями на основе полисахаридов, после контактирования в течение 60 мин с раствором фагов в статическом режиме, адсорбированных фаговых частиц не наблюдается. Это согласуется с литературными данными о низком сродстве фаговых частиц к гидрофильным поверхностям, содержащими карбоксильные группы [4].

Эффективная адсорбция фаговых частиц на карбоксилированных поверхностях наблюдается в случае предварительной активации групп карбодиимидным способом и последующем ковалентном связывании [5]. Однако в работе [6] показано, что физическая адсорбция на поверхностях модифицированных самоорганизующимися монослоями (SAM) с карбоксильными, альдегидными и метильными концевыми группами может быть столь же эффективной, как и ковалентное связывание с помощью активированных карбоксильных групп. При этом авторы [7] отмечают, что модификация поверхности альдегидными и метильными группами была настолько эффективна в снижении адсорбции фагов, что их можно использовать в качестве «антифаговых поверхностей».

Следует отметить, что в случае гидрофильных материалов может наблюдаться не адсорбция, а сорбция фаговых частиц. Так, для фага *Escherichia phage* БИМ BV-67 Г наблюдается сорбция на поверхности функциональных покрытий Pectin Citrus и Pectin Amid и сохранение его литической активности (лизис культуры бактерии-хозяина в течение 1–2 ч).



а  
**Рисунок – КУС покрытий, сформированных на гибких ПЭТФ подложках из воды (а) и покрытий, сформированных на кремниевых подложках (б)**

Наибольшее общее количество сорбированных фаговых частиц *Bacillus* phage БИМ BV-90 Г отмечено для подложек, покрытых Pectin Classic, Pectin Classic Ox и Pectin Classic25Ag, однако ни один из функциональных биополимеров не обеспечивал сохранение литической активности фага. Бактериофаг *Aeromonas* phage БИМ BV-140 наиболее эффективно сорбировался на поверхности кремниевых подложек, покрытых PSS, Pectin Citrus и Pectin Classic, однако для иммобилизованных фагов отмечено существенное снижение или потеря литической активности.

Таким, образом, полученные нами данные о свойствах поверхности ультратонких пленок пектинов и их производных и особенностях взаимодействия фаговых частиц с их поверхностью могут стать основой для разработки функциональных покрытий обеспечивающих контролирующую сорбцию вирусов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (договор № Б25УЗБ-078/01 и Б25УЗБ-078).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Phage-based sensors in medicine: a review / Machera S. J., Niedziółka-Jönsson J., Szot-Karpińska K. // *Chemosensors*. – 2020. – V. 8. – №. 3. – P. 61.
2. Layer-By-Layer Nanocoating of Antiviral Polysaccharides on Surfaces to Prevent Coronavirus Infections / Otto DP, de Villiers MM. // *Molecules*. – 2020. – V. 25(15). – P. 3415.
3. Antiviral surfaces and coatings and their mechanisms of action / Rakowska, P.D., Tiddia, M., Faruqi, N. et al. // *Commun Mater* 2, 53 (2021).
4. T4 bacteriophage conjugated magnetic particles for E. coli capturing: Influence of bacteriophage loading, temperature and tryptone / Liana, A. E., Marquis, C. P., Gunawan, et al. // *Colloids and Surfaces B: Biointer-*

faces. – 2017. – V. 151. – P. 47-57.

5. Strategies for surface immobilization of whole bacteriophages: A review / O'connell L., Marcoux P. R., Roupioz Y. // ACS Biomaterials Science & Engineering. – 2021. – V. 7. – №. 6. – P. 1987-2014.

6. Immobilization of bacteriophages on modified silica particles / Cademartiri, R., Anany, H., Gross, et al. //Biomaterials. – 2010. – V. 31. – №. 7. – P. 1904-1910.

7. Effects of Surface Functionalization on the Surface Phage Coverage and the Subsequent Performance of Phage-Immobilized Magnetoelastic Biosensors / Horikawa S.; Bedi D.; Li S. et al. / Biosens. Bioelectron. – 2011. – V. 26 (5). P. 2361–2367.

УДК: 579.68:579.844:663

И. Турдибекова, А. И. Кулонов

(Ташкентский международный университет Кимё, Ташкент, Узбекистан)

## **МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПРИАРАЛЬЯ**

Экстремальные местообитания достаточно широко распространены в природе, хотя могут иметь и антропогенное происхождение. Ярким примером экстремальной экологической ниши в нашей республике является регион Приаралья, где сконцентрировано несколько природных факторов, сильно отличающихся от привычной среды обитания. Современное Аральское море представляет собой экстремальную экосистему, в которой, казалось бы, нет жизни. Однако, это не так. Соленые воды Арала, осадки со дна, бывшее дно моря, оголившееся 10, 30 и более лет назад, подземные источники и особенно пресное озеро Судочье, изобилуют жизнью: здесь процветают сообщества экстремофильных микроорганизмов, сведения о которых до сих пор очень ограничены.

Экосистемы природных экстремальных местообитаний, за небольшими исключениями, в большинстве образованы прокариотными микроорганизмами. Помимо высокоспециализированных истинных экстремофилов в них входят организмы с широким диапазоном роста в зависимости от того или иного фактора. Роль и соотношение этих двух групп в большой степени определяется постоянством условий в экстремальном местообитании. Микробное сообщество представляет собой совокупность взаимодействующих между собой микроорганизмов, связанных различными, прежде всего трофическими связями. Неслучайно, многие работы последних лет направлены на изучение не отдельных представителей экстремофилов, а сообществ, населяющих