

2. Органический атлас России // Изд-во ФГБНУ «Росинформпротех», 2025. – 233 с.

3. Мезенова О.Я. Современная пищевая биотехнология: основные проблемы и вызовы // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 35–46. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-35-46.

4. Измайлович И.Б. Эффективность импортозамещения рыбной муки и подсолнечникового шрота кормовой добавкой сухой молочной сыворотки в комбикормах кур-несушек [Электронный ресурс]. – URL: <file:///C:/Users/nemenuschaya/Downloads/effektivnost-importozamesheniya-rybnoy-muki-i-podsolnechnikovogo-shrota-kormovoy-dobavkoj-suhoy-molochnoy-syvorotki-v-kombikormah-kur-nesushek.pdf> (дата обращения: 22.08.2025).

5. Перспективы использования вторичных ресурсов мясоперерабатывающих отраслей на основе патентных исследований / В. А. Углов, В. Г. Шелепов, Е. В. Бородай, В. А. Слепчук // Инновации и продовольственная безопасность. – 2020. – № 3(29). – С. 39-46. – DOI 10.31677/2311-0651-2020-29-3-39-46.

6. Вольф, А. А. Комплексная переработка кости для пищевых целей / А. А. Вольф, И. С. Киселева, Ф. Я. Рудик // Технологии и продукты здорового питания: Сборник статей XII Национальной научно-практической конференции с международным участием, Саратов, 17–18 декабря 2020 года / Под общей редакцией Н.В. Неповинных, О.М. Поповой, Е.В. Фатьянова. – Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2021. – С. 101–104.

7. Иванкин А.Н. Биотехнологическая трансформация костной ткани животного происхождения в продукты с высокой биологической ценностью // Биотехнология. – 2022. – Т. 38. – № 1. – С. 25–33.

8. ИТС-43-2023. [Электронный ресурс]. – URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=2099&etkstructure_id=1872 (дата обращения: 05.09.2025).

УДК: 544.032+547.97+577.114

Е. В. Хаинская, асп., мл. науч. сотр.,
К. С. Гилевская, канд. хим. наук, вед. науч. сотр.
(ИХНМ НАН Беларуси, г. Минск)

ПОЛУЧЕНИЕ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КАПСУЛИРОВАННЫХ ФОРМ ХЛОРОФИЛЛА

По данным ВОЗ около 80% всех заболеваний так или иначе связано с питанием, а 41% – с основными детерминантами питания [1]. Для решения данной проблемы в последние годы большое внимание уделяется созданию функциональных продуктов. Природный пигмент хлорофилл обладает физиологической активностью [2], однако его

применение ограничено низкой стабильностью при обработке и хранении, что приводит к потере свойств [3]. Одним из подходов к улучшению стабильности биологически активных веществ является капсулирование в полимерные матрицы [4]. Перспективными биополимерными носителями благодаря комплексу свойств являются полисахариды [5]. Цель работы – разработка методики инкапсулирования хлорофилла в полисахаридные матрицы и изучение физико-химических свойств полученных материалов. В работе использовали хитозан (Хит, $M_w \sim 250$ кДа, СД $\sim 98\%$), пектин амидированный (Пект, $M_w \sim 120$ кДа, СЭ=33%, СА=18%) и хлорофилл (Х). Капсулированные формы хлорофилла получали методом ионотропного гелеобразования. Для характеристики частиц использовали УФ/вид- и ИК-спектроскопии, термогравиметрический анализ (ТГА), сканирующую электронную (СЭМ) и атомно-силовую микроскопии (АСМ), а также методы электрофоретической подвижности и динамического светорассеивания (ДЛС).

Эффективность включения (ЕЕ) хлорофилла составляет 96,3–99,7% и 35,7–99,6%, а массовая доля (W) достигает 38,0% и 33,2% для частиц на основе Хит (Хит-Х) и Пект (Пект-Х), соответственно. Успешное включение хлорофилла в матрицы полисахаридов подтверждают результаты ТГА, УФ/вид- и ИК-спектроскопии, а определенные методом ДЛС значения гидродинамического диаметра ($\sim 0,7$ мкм и 1,5–1,7 мкм для хитозановых и пектинатных частиц, соответственно) согласуются с результатами СЭМ и АСМ. Показано, что использование криопротекторов (сахарозы и трегалозы) позволяет получать аморфизированные редиспергируемые лиофилизаты с сохранением основных физико-химических характеристик исходных гидрозолей. Определена антиоксидантная активность нативного и капсулированного хлорофилла. Рассчитанное значение IC_{50} , соответствующее концентрации вещества, обеспечивающей 50%-ное обесцвечивание (I), исходного красителя составляет $1,240 \pm 0,015$ мг/мл. При капсулировании хлорофилла в полисахаридные матрицы наблюдается уменьшение его антиоксидантной активности: в 1,25 раза для хитозановых матриц и в 1,97–3,47 раза для пектинатных матриц (таблица).

Таблица – Антиоксидантная активность капсулированного хлорофилла

Тип полимерной матрицы частиц	I , %	ABTS-активность относительно нативного хлорофилла, мг-экв/мл
Хит	54,89–55,93	0,80
Пект	7,87–14,77	0,29–0,51

Для нативного хлорофилла (рис. 2д, о) при облучении в течение 6 часов наблюдается уменьшение интенсивности поглощения в видимой области на 10,7% (403 нм, Сор-полоса) и 36,7% (626 нм, Q-полоса), что указывает на фотодеструкцию молекул красителя.

В спектрах частиц хитозана, содержащих пигмент, за 360 мин облучения интенсивность Соре-полосы (406 нм) снижается на ~13,5%, а Q-полосы (627 нм) – повышается на ~7%. Оцененные значения константы реакции составляют $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ и $2,3 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ для нативного хлорофилла и включенного в хитозановые частицы, соответственно. Анализ фотоиндуцированных изменений «красной» характеристической полосы (полосы Q) хлорофилла, включенного в пектинатные частицы, позволяет установить улучшение фотостабильности по сравнению с нативным пигментом на 2,7–22,8%. Рассчитанные константы скорости составляют $0,5–0,8 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$.

Таким образом, изучены закономерности взаимодействия хлорофилла с положительно (Хит) и отрицательно (Пект) заряженными полисахаридами. Разработаны методики получения инкапсулированных форм хлорофилла за счет его включения *in situ* в микрочастицы Хит и Пект, позволяющие получать частицы полисахарид-хлорофилл с высокой ЕЕ (до 100%) и W пигмента до 38%, регулируя условия синтеза. Разработана методика получения редиспергируемых сухих порошков капсулированных форм хлорофилла.

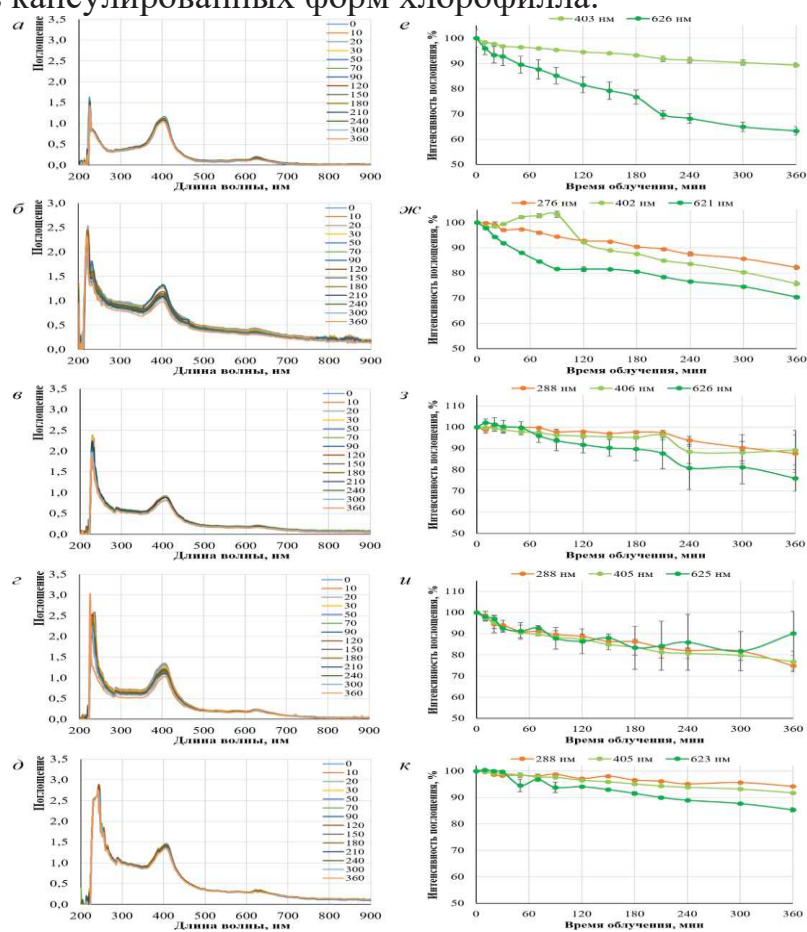


Рисунок – Спектры поглощения (а–д) и графики зависимости интенсивности поглощения от времени облучения (е–к) для хлорофилла (а, е), частиц Хит-Х (б, ж) и Пект-Х (в-д, з-к)

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