

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

ХИМИЯ
CHEMISTRY

УДК 544.77+547.917

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-164-172>

Поступило в редакцию 22.10.2019

Received 22.10.2019

**А. Н. Красковский¹, В. И. Куликовская¹, О. В. Молчан², К. С. Гилевская¹,
В. М. Юрин³, академик В. Е. Агабеков¹**¹*Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*²*Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*³*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь***ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ГИДРОГЕЛЕВЫХ НАНОЧАСТИЦ ПЕКТИНАТА
КАЛЬЦИЯ С ТРАНС-КОРИЧНОЙ КИСЛОТОЙ**

Аннотация. Получены отрицательно заряженные ($-13,5 \pm 5,0$ мВ) гидрогелевые нано- и субмикрочастицы (50–150 нм) пектината кальция. Разработана методика, позволяющая включать в них до 40 мас. % регулятора роста растений – транс-коричную кислоту (ТКК). Установлено, что полное высвобождение ТКК в среде культивирования клеток (Мурасиге–Скуга) протекает за 2,5 ч. Полученные частицы пектината кальция не влияют на ростовые процессы клеток суспензионной культуры и могут быть использованы в качестве нейтральных носителей регуляторов роста.

Ключевые слова: пектин, гидрогелевые наночастицы, транс-коричная кислота, суспензионные культуры

Для цитирования: Получение и свойства гидрогелевых наночастиц пектината кальция с транс-коричной кислотой / А. Н. Красковский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 164–172. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-164-172>

**Aliaksandr N. Kraskouski¹, Viktoriya I. Kulikouskaya¹, Olga V. Molchan², Kseniya S. Hileuskaya¹,
Vladimir M. Yurin³, Academician Vladimir E. Agabekov¹**¹*Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*²*V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*³*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***FABRICATION AND PROPERTIES OF CALCIUM PECTINATE HYDROGEL NANOPARTICLES
WITH TRANS-CINNAMIC ACID**

Abstract. Hydrogel negatively charged (-13.5 ± 5.0 mV) calcium pectinate nano- and submicroparticles (50–150 nm) were obtained. A technique for entrapment of a plant growth regulator (trans-cinnamic acid) in the particles up to 40 wt. % has been developed. It has been established that the complete release of trans-cinnamic acid in the Murashige–Skoog medium takes 2.5 hours. The obtained particles of calcium pectinate do not affect the growth processes of cells in suspension culture and can be used as neutral carriers for growth regulators.

Keywords: pectin, hydrogel nanoparticles, trans-cinnamic acid, suspension cultures

For citation: Kraskouski A. N., Kulikouskaya V. I., Molchan O. V., Hileuskaya K. S., Yurin V. M., Agabekov V. E. Fabrication and properties of calcium pectinate hydrogel nanoparticles with trans-cinnamic acid. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 164–172 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-2-164-172>

Введение. В настоящее время ведущие мировые фармацевтические компании помимо создания новых лекарственных веществ уделяют большое внимание разработке новых средств доставки активных ингредиентов в виде нано- и микрокапсул. Использование таких микро- и на-

ноконтейнеров для капсулирования биологически активных соединений позволяет повысить эффективность их действия, а также получить лекарственные формы с контролируемым временем поступления в организм и/или целевой доставкой [1; 2]. Использование наноматериалов в сельском хозяйстве также приобретает все более широкое распространение: они активно применяются для стимулирования роста и продуктивности растений [3]. В связи с этим весьма актуальным является создание микро- и наноcontainers для доставки регуляторов роста растений. Одним из подходов, направленных на создание препаратов пролонгированного действия, является получение полимерных производных регуляторов роста, выделение активного компонента из которых происходит за счет гидролиза эфирных связей [4]. Другой подход к получению пролонгированных форм биологически активных веществ заключается во введении активного компонента в гидрогелевые биополимерные наночастицы. Так, авторы [5–7] показали, что при включении гибберелловой кислоты в состав гидрогелевых наночастиц на основе полисахаридов (альгинат, хитозан) наблюдается повышение стабильности фитогормона и эффективности его действия на фасоль обыкновенную (*Phaseolus vulgaris*), а обработка такой нанокапсулированной формой семян томата (*Solanum lycopersicum*) приводит к 4-кратному повышению их продуктивности.

Получение и исследование клеточных культур лекарственных растений как продуцентов ценных вторичных метаболитов – важное направление биотехнологии. Наиболее перспективным является введение в культуру лекарственных растений, обладающих уникальными фармакологическими свойствами. К ним относят и различные виды рода *Vinca*. В настоящее время препараты, полученные из сырья растений рода *Vinca*, используют для улучшения мозгового кровообращения, в качестве средств с сосудорасширяющим, гипотензивным и слабым седативным действием. В Республике Беларусь дикорастущие представители этого рода отсутствуют, а в культуре выращивают 3 вида: *V. minor*, *V. major* и *V. herbacea*. Ранее нами было показано положительное воздействие наноматериалов на некоторые биологические процессы, например, под действием фуллеренола отмечена стимуляция прорастания семян и роста проростков ячменя, увеличение содержания каротиноидов в листьях [9; 10], поэтому представлялось целесообразным использовать их как инструмент для повышения биопроductивности клеточных культур. Для доставки регулятора роста были выбраны гидрогелевые наночастицы на основе природного нетоксичного и биосовместимого полисахарида пектина.

Цель работы – получение наночастиц пектината кальция, содержащих регулятор роста растений (транс-коричную кислоту), и установление влияния нанокапсулированной формы на ростовые процессы в суспензионной культуре *Vinca minor*.

Экспериментальная часть. *Синтез наночастиц пектината кальция.* Наночастицы пектината кальция синтезировали методом ионотропного гелеобразования по ранее разработанной методике [11]. Для этого к раствору CaCl_2 (10 мг/мл) при постоянном перемешивании на магнитной мешалке через капельную воронку медленно по каплям добавляли равный объем водного раствора низкометоксилированного пектина (Herbstreith & Fox, степень этерификации 35–42 %, $M_v \sim 89000$) с концентрацией 1 мг/мл. Полученные наночастицы пектината кальция отделяли от маточного раствора центрифугированием и дважды промывали дистиллированной водой.

Характеристика частиц пектината кальция. Величину ζ -потенциала частиц пектината кальция определяли по их электрофоретической подвижности с помощью анализатора Zetasizer Nano-ZS (Malvern, Великобритания).

Атомно-силовые (АСМ) микрофотографии частиц, адсорбированных на положительно заряженный подслоем полиэтиленimina, получали на сканирующем зондовом микроскопе MultiMode III (Veeco, США). Условия сканирования: скорость – 3–5 Гц; кантилевер из нитрида кремния с константой жесткости 0,12 Н/м. Изображения обрабатывали, используя программное обеспечение Nanoscope 5.31rl.

Просвечивающие электронные (ПЭМ) микрофотографии частиц получали на микроскопе JEM-100 CX (Jeol, Япония). Для этого частицы пектината кальция адсорбировали из водных рас-

творов на подслое поливинилформала, нанесенного на медную сеточку, и сушили при комнатной температуре.

Включение транс-коричной кислоты (ТКК) в частицы пектината кальция. В предварительно синтезированные частицы пектината кальция включали ТКК путем сорбции (1 ч) из ее спиртовых растворов (96 %). Концентрацию ТКК варьировали от 0,01 до 25 мг/мл.

Эффективность включения (ЭВ) и массовую долю (ω) ТКК в наночастицах пектината кальция рассчитывали по формулам

$$\text{ЭВ} = \frac{m_0 - m_1}{m_0} 100 \%,$$

где m_1 – масса ТКК в супернатанте, мг; m_0 – исходная масса ТКК в растворе до сорбции, мг.

$$\omega = \frac{m_0 - m_1}{m_{\text{ч}}} 100 \%,$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса лиофильного порошка наночастиц пектината кальция с ТКК, мг.

Концентрацию ТКК в исходном растворе и супернатанте определяли по предварительно построенному калибровочному графику в координатах $A_{\lambda=270} = f(C_{\text{ТКК}})$. Для этого регистрировали интенсивность поглощения растворов при длине волны 270 нм на спектрофлуориметре Solar (Беларусь) в кварцевой кювете с длиной оптического пути 1 см. Лиофилизированные порошки частиц получали на лиофильной сушке Freezone 1.0 (Labconco, США) при $-47,0$ °С в течение 8 ч и давлении 0,04 мбар.

Кинетику высвобождения ТКК из частиц пектината кальция изучали при 24,0 °С в среде Мурасиге–Скуга, используемой для культивирования суспензионных культур. Для этого в диализную трубку (размер пор 14 кДа, Sigma D9652-100FT) помещали влажный осадок частиц с ТКК, погружали ее в пробирку, содержащую среду Мурасиге–Скуга, и через определенные промежутки времени отбирали аликвоты по 1 мл, заменяя их эквивалентным объемом свежего раствора. В отобранных аликвотах спектрофотометрически определяли количество высвободившейся ТКК.

Культивирование и определение ростовых параметров клеток суспензионной культуры. Объектом исследования являлись клетки гетеротрофной суспензионной культуры *Vinca minor* L. Культуру выращивали в темноте на среде Мурасиге–Скуга, содержащей 30 г/л сахарозы, 1 мг/л нафтилуксусной кислоты и кинетина. Пересадку осуществляли каждые 25 суток. Клеточные суспензии культивировали с частицами пектината кальция в течение ростового цикла. Для оценки активности ростовых процессов определяли индекс роста, удельную скорость роста и время удвоения биомассы. Анализ ростовых параметров проводили в течение 5 пассажей. Для обработки полученных результатов были использованы стандартные методы вариационной статистики. Данные на гистограммах представлены в виде средней арифметической величины и ошибки средней величины.

Результаты и их обсуждение. Наночастицы пектината кальция синтезировали методом ионотропного гелеобразования. В качестве сшивающего агента для пектина использовали хлорид кальция, так как катионы Ca^{2+} являются биосовместимыми, нетоксичными и обладают высокой желирующей способностью по отношению к данному полисахариду. Сформированные частицы представляют собой ионотропные гели, которые являются обратимыми [11]. Пространственная структурная сетка таких гидрогелей закреплена за счет переплетения макромолекул, а также ионных и водородных связей и гидрофобных взаимодействий, которые могут быть разрушены при изменении ионной силы и pH среды. В связи с этим такие частицы являются перспективными носителями низкомолекулярных биологически активных веществ для обеспечения их пролонгированного высвобождения.

Согласно данным ПЭМ и АСМ, синтезированные частицы имеют округлую форму (рис. 1, а, б), а их размер, рассчитанный по ПЭМ-изображениям, находится в диапазоне от 50 до 150 нм. Нано-

частицы пектината кальция обладают отрицательным зарядом, который обусловлен наличием свободных (несвязанных с катионами кальция) ионизированных карбоксильных групп, при этом величина их ξ -потенциала составляет $(-13,5 \pm 5,0)$ мВ (рис. 1, *c*).

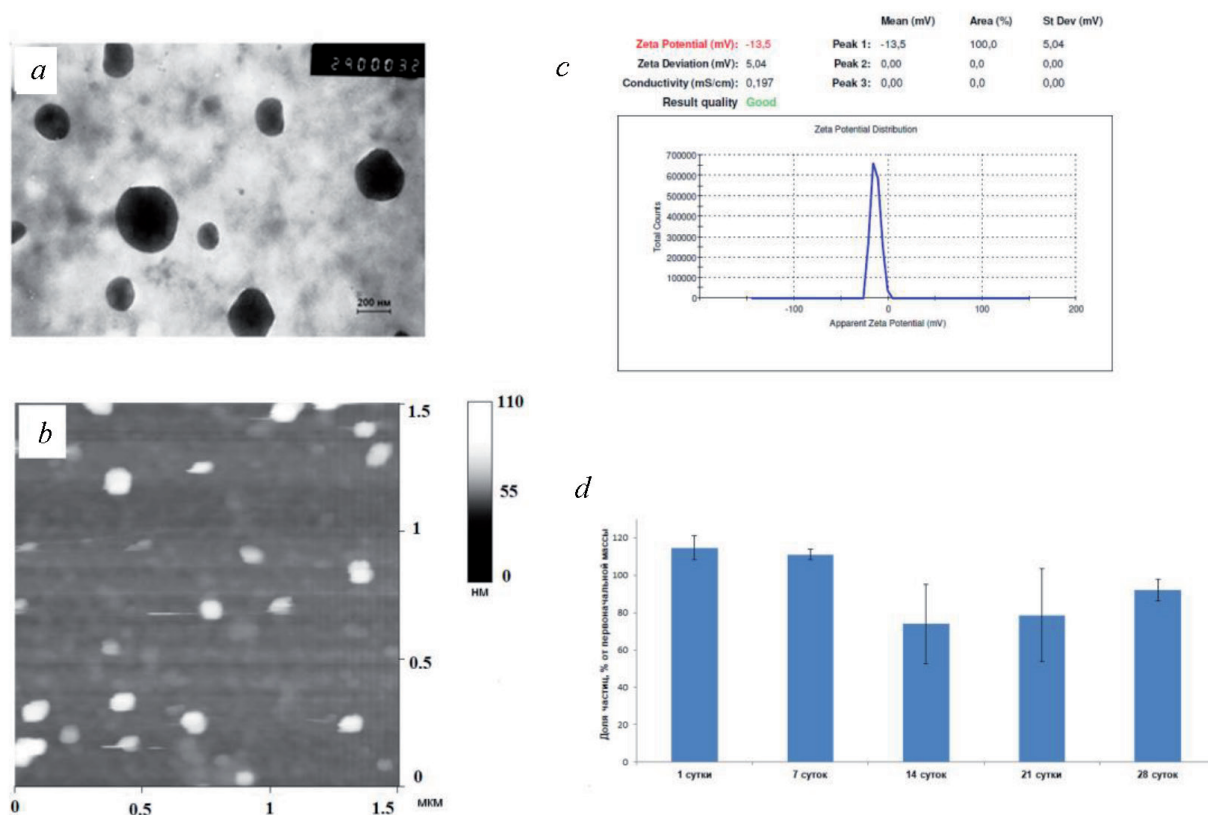


Рис. 1. ПЭМ (*a*) и АСМ (*b*) изображения наночастиц пектината кальция, а также их ξ -потенциал (*c*) и устойчивость в среде Мурасиге–Скуга (*d*)

Fig. 1. TEM (*a*) and AFM (*b*) images of pectinate calcium nanoparticles, as well as their ξ -potential (*c*) and stability in Murashige–Skoog medium (*d*)

Для использования синтезированных гидрогелевых наночастиц в качестве носителей регуляторов роста растений они должны быть устойчивы в среде для культивирования суспензионных культур. При выдерживании частиц в среде Мурасиге–Скуга их деградации в течение первых семи суток не наблюдается: масса остается на уровне исходной (рис. 1, *d*). За 4 недели, в течение которых культивируют суспензионные культуры, доля разрушенных частиц составляет не более 20–25 % (рис. 1, *d*).

Культивирование суспензии клеток *V. minor* в присутствии частиц пектината кальция не приводило к достоверному снижению интенсивности ростовых процессов. Более того, в случае использования 0,5 и 1,0 % частиц даже наблюдается увеличение среднего значения индекса и удельной скорости роста, а также уменьшение времени удвоения биомассы клеток в суспензии (рис. 2).

Таким образом, полученные гидрогелевые наночастицы пектината кальция являются практически нейтральными носителями по отношению к суспензионным культурам растительных клеток и могут быть использованы в качестве контейнеров для включения регуляторов роста растений.

В качестве модельного регулятора роста растений была взята ТКК – ингибитор фенольной природы. Эффективность включения ТКК в частицы пектината кальция не превышает 30 % (таблица). Увеличение концентрации ТКК в растворе на два порядка с 0,01 до 2,0 мг/мл приводит к повышению эффективности ее включения в частицы пектината кальция путем сорбции примерно в ~2 раза, однако при дальнейшем изменении содержания ТКК от 2 до 10 мг/мл этот пара-

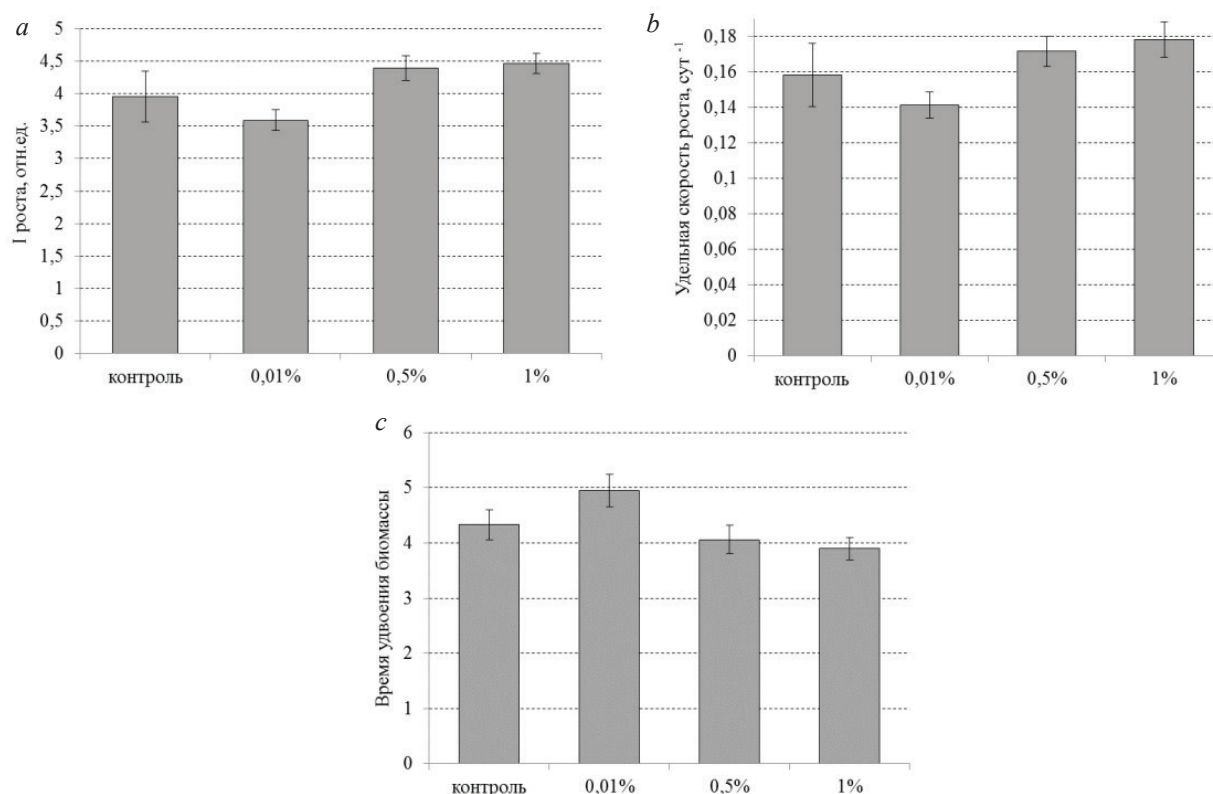


Рис. 2. Влияние концентрации наночастиц пектината кальция в среде на ростовые параметры суспензионной культуры *Vinca minor* L.: индекс роста (a), удельная скорость роста (b) и время удвоения биомассы (c)

Fig. 2. The effect of concentration of calcium pectinate nanoparticles in media on the growth parameters of *Vinca minor* L. suspension culture: growth index (a), specific growth rate (b) and biomass doubling time (c)

метр остается неизменным. Следует отметить, что массовая доля ТКК в частицах увеличивается от $0,07 \pm 0,02$ до $42,5 \pm 0,7$ мас. % при изменении концентрации ТКК в растворе от 0,01 до 10 мг/мл. При этом использование растворов с содержанием ТКК 25 мг/мл приводит к снижению эффективности ее включения в 1,6 раза, а массовая доля активного компонента остается около 40 % (таблица). Такое изменение значений эффективности включения и массовой доли ТКК может быть связано с достижением максимальной емкости частиц по активному компоненту (~40 мас. %) уже при концентрации 10 мг/мл. Наблюдаемая относительно низкая эффективность

Параметры включения ТКК в частицы пектината кальция
Parameters of entrapment of trans-cinnamic acid in calcium pectinate particles

Концентрация раствора ТКК, мг/мл Concentration of the trans-cinnamic acid solution, mg/ml	Эффективность включения, % Entrapment efficiency, %	Массовая доля ТКК в частицах, мас. % Mass fraction of trans-cinnamic acid in particles, wt. %	ξ -потенциал, мВ ξ -potential, mV
0,01	$12,2 \pm 3,7$	$0,07 \pm 0,02$	$-11,8 \pm 1,6$
0,1	$18,9 \pm 5,0$	$1,4 \pm 0,1$	$-10,7 \pm 0,4$
1,0	$15,4 \pm 1,4$	$5,9 \pm 1,3$	$-7,9 \pm 0,2$
2,0	$23,6 \pm 1,0$	$19,5 \pm 2,1$	$-9,6 \pm 2,9$
5,0	$21,1 \pm 3,5$	$22,0 \pm 2,8$	$-11,7 \pm 2,1$
7,5	$25,5 \pm 0,5$	$33,0 \pm 1,4$	$-15,2 \pm 0,4$
10,0	$25,0 \pm 7,0$	$42,5 \pm 0,7$	$-7,7 \pm 1,1$
25,0	$16,1 \pm 2,5$	$41,5 \pm 0,7$	$-9,6 \pm 2,1$

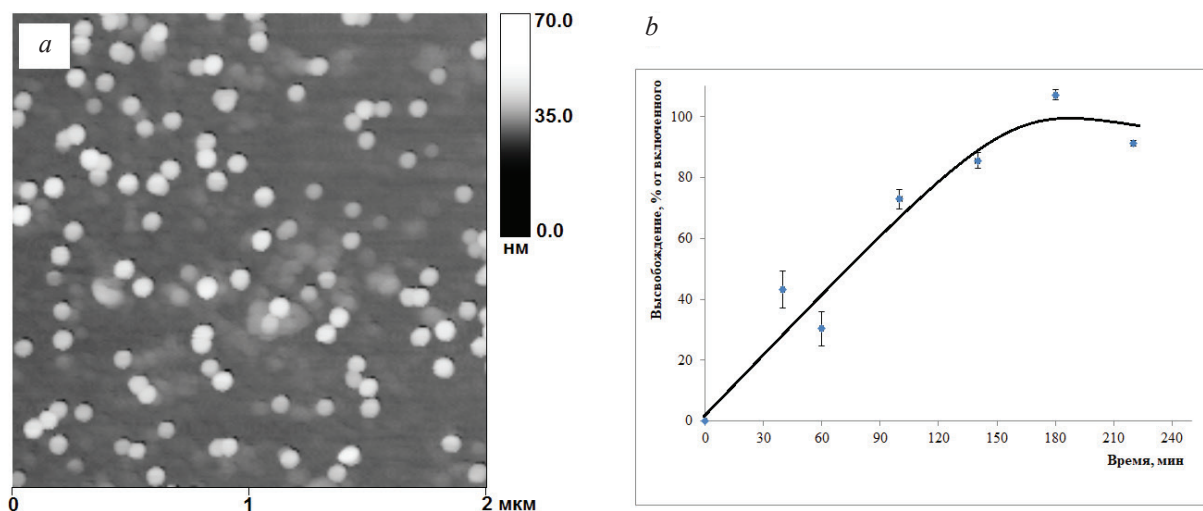


Рис. 3. АСМ изображение наночастиц пектината кальция, содержащих ТКК (а), и кинетическая кривая высвобождения ТКК в среде Мурасиге–Скуга (b)

Fig. 3. ACM image of calcium pectinate nanoparticles containing cinnamic acid (a) and kinetic curve of its release in Murashige–Skoog medium (b)

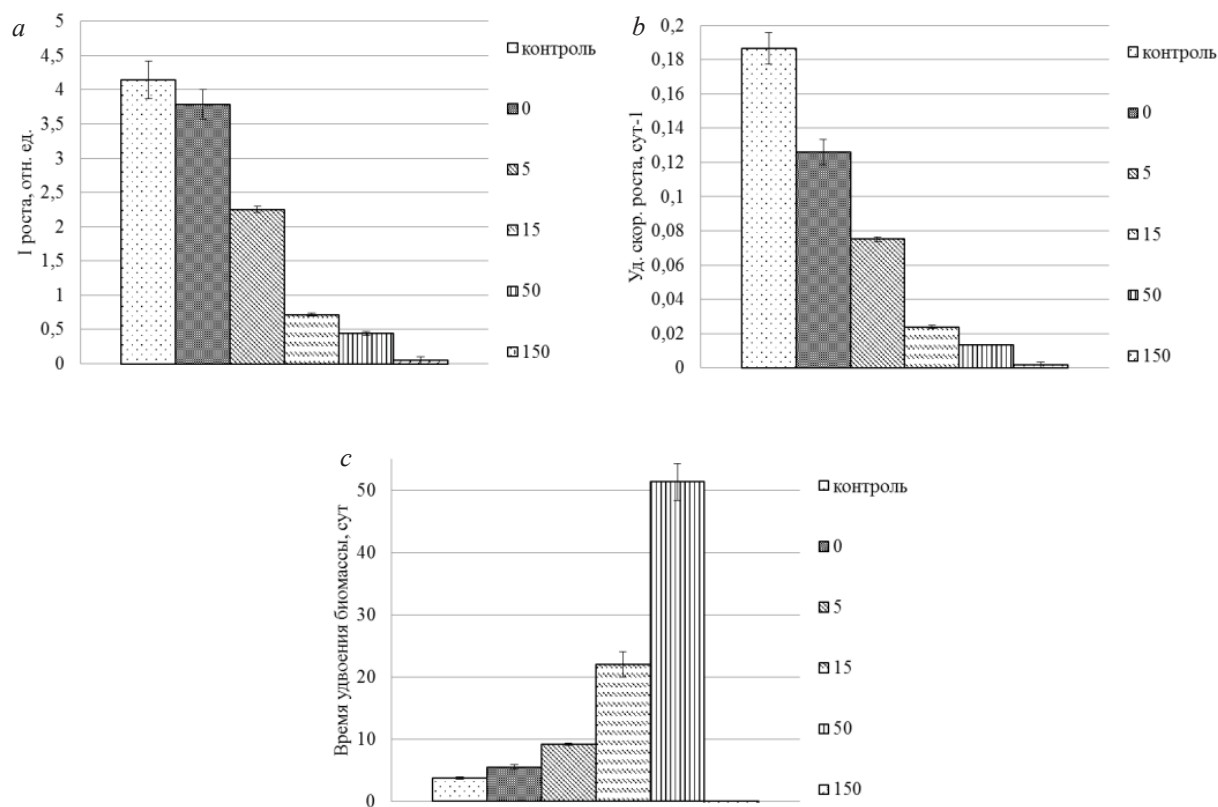


Рис. 4. Влияние наночастиц пектината кальция, содержащих ТКК в концентрации от 5 до 150 мкг/мл, на ростовые параметры суспензионной культуры *Vinca minor* L.: индекс роста (а), удельная скорость роста (b) и время удвоения биомассы (c)

Fig. 4. The effect of calcium pectinate nanoparticles containing cinnamic acid in a concentration of from 5 to 150 μg/ml on the growth parameters of a *Vinca minor* L. suspension culture: growth index (a), specific growth rate (b) and biomass doubling time (c)

включения ТКК в наночастицы пектината кальция (<30 %) обусловлена, по-видимому, отсутствием электростатического взаимодействия между включаемым веществом и материалом носителя, так как и частицы пектината кальция, и ТКК заряжены отрицательно. Не исключено, что включение ТКК происходит преимущественно за счет ее механического внедрения в гидрогелевую сетку полисахаридных частиц.

Включение ТКК в частицы пектината кальция не оказывает существенного влияния на их характеристики: они сохраняют свою сферическую форму и отрицательный заряд (рис. 3, *a*). Увеличения ξ -потенциала по абсолютному значению по сравнению с исходными частицами также не наблюдается, что подтверждает внедрение молекул ТКК внутрь частиц, а не аккумулярование на их поверхности (таблица).

Высвобождение активных компонентов из полимерных носителей может протекать путем их диффузии, а также за счет разрушения полимерной матрицы [1]. Кинетическая кривая высвобождения ТКК в среде Мурасиге–Скуга, используемой для культивирования суспензионных культур, свидетельствует о том, что зависимость количества высвободившейся ТКК от времени носит прямолинейный характер при $t = 0$ –150 мин, а затем запределивается и через 3 ч выход активного компонента достигает максимума (рис. 3, *b*). Результаты кинетических измерений подтверждают, что включение ТКК происходит путем «механического» внедрения в гидрогелевую сетку частиц, а высвобождение протекает за счет диффузии.

Введение частиц пектината кальция с ТКК в среду Мурасиге–Скуга при культивировании суспензионной культуры *Vinca minor* L. из расчета, что конечная концентрация ТКК составит 5,0–150,0 мкг/мл, приводит к существенному снижению активности ростовых процессов, оцениваемых по следующим параметрам: индекс роста, удельная скорость роста, время удвоения биомассы (рис. 4).

Заключение. Получены отрицательно заряженные гидрогелевые наночастицы пектината кальция и разработана методика включения в них ТКК. Показано, что варьируя концентрацию ТКК в растворе при сорбции, можно получать частицы с заданным содержанием активного компонента до 40 мас. %. Установлено, что синтезированные наночастицы пектината кальция устойчивы в среде Мурасиге–Скуга, а включенная в них ТКК полностью высвобождается через 3 ч. Полученные частицы пектината кальция не влияют на ростовые процессы клеток суспензионной культуры и, таким образом, могут быть использованы в качестве нейтральных носителей биологически активных регуляторов роста и метаболизма растительных клеток, продуцирующих фармакологически ценные вторичные метаболиты.

Список использованных источников

1. Hydrogel Nanoparticles of Chitosan–Folic-Acid Conjugate with Imatinib Methanesulfonate / M. E. Lozovskaya [et al.] // Pharm. Chem. J. – 2018. – Vol. 52, N 2. – P. 127–132. <https://doi.org/10.1007/s11094-018-1777-6>
2. Preparation and Properties of Protamine/Pectin-Ag Biopolymer Microcapsules Containing a 2-Arylamino-pyrimidine Derivative / K. S. Gilevskaya [et al.] // Pharm. Chem. J. – 2018. – Vol. 51. – P. 922–927. <https://doi.org/10.1007/s11094-018-1717-5>
3. Effects of Engineered Nanomaterials on Plants Growth: An Overview / F. Aslani [et al.] // Sci. World J. – 2014. – Vol. 2014. – Art. ID 641759. – 28 p. <https://doi.org/10.1155/2014/641759>
4. Tsatsakis, A. M. Polymeric derivatives of plant growth regulators: synthesis and properties / A. M. Tsatsakis, M. I. Shtilman // Plant Growth Regul. – 1994. – Vol. 14, N 1. – P. 69–77. <https://doi.org/10.1007/bf00024143>
5. Chitosan nanoparticles as carrier systems for the plant growth hormone gibberellic acid / A. E. S. Pereira [et al.] // Colloids Surfaces B: Biointerfaces. – 2017. – Vol. 150. – P. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.11.027>
6. Pereira, A. E. S. Polymeric nanoparticles as an alternative for application of gibberellic acid in sustainable agriculture: a field study / A. E. S. Pereira, H. C. Oliveira, L. F. Fraceto // Sci. Rep. – 2019. – Vol. 9. – Art. 7135 (1–10). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43494-y>
7. γ -Polyglutamic acid/chitosan nanoparticles for the plant growth regulator gibberellic acid: Characterization and evaluation of biological activity / A. E. S. Pereira [et al.] // Carbohydr. Polym. – 2017. – Vol. 157. – P. 1862–1873. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.073>
8. Особенности распространения и эколого-ценотическая характеристика видов рода *Vinca* L. во флоре Беларуси / М. А. Джус [и др.] // Укр. ботан. журн. – 2009. – Вып. 66. – С. 783–793.
9. Юрин, В. М. Наноматериалы и растения: взгляд на проблему / В. М. Юрин, О. В. Молчан // Тр. Белорус. гос. ун-та. Сер. «Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем». – 2015. – Т. 10, № 1. – С. 9–21.

10. Молчан, О. В. Влияние фуллеренола на ростовые параметры и содержание фотосинтетических пигментов в проростках ячменя / О. В. Молчан, Е. В. Запрудская, Т. Н. Куделина // Ботаника (исслед.): сб. науч. тр. – Минск, 2017. – Вып. 46. – С. 221–229.

11. Получение и свойства наночастиц пектината кальция / А. Н. Красковский [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2014. – № 1. – С. 51–56.

References

1. Lozovskaya M. E., Kulikovskaya V. I., Ignatovich Zh. V., Koroleva E. V., Agabekov V. E. Hydrogel Nanoparticles of Chitosan–Folic-Acid Conjugate with Imatinib Methanesulfonate. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 127–132. <https://doi.org/10.1007/s11094-018-1777-6>

2. Gilevskaya K. S., Ignatovich Zh. V., Golubeva M. B., Koroleva E. V., Agabekov V. E. Preparation and Properties of Protamine/Pectin-Ag Biopolymer Microcapsules Containing a 2-Arylamino-pyrimidine Derivative. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2018, vol. 51, no. 10, pp. 922–927. <https://doi.org/10.1007/s11094-018-1717-5>

3. Aslani F., Bagheri S., Muhd Julkapli N., Juraimi A. S., Hashemi F. S. G., Baghdadi A. Effects of Engineered Nanomaterials on Plants Growth: An Overview. *Scientific World Journal*, 2014, vol. 2014, art. ID 641759. 28 p. <https://doi.org/10.1155/2014/641759>

4. Tsatsakis A. M., Shtilman M. I. Polymeric derivatives of plant growth regulators: synthesis and properties. *Plant Growth Regulation*, 1994, vol. 14, no. 1, pp. 69–77. <https://doi.org/10.1007/bf00024143>

5. Pereira A. E. S., Silva P. M., Oliveira J. L., Oliveira H. C., Fraceto L. F. Chitosan nanoparticles as carrier systems for the plant growth hormone gibberellic acid. *Colloids Surfaces B: Biointerfaces*, 2017, vol. 150, pp. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.11.027>

6. Pereira A. E. S., Oliveira H. C., Fraceto L. F. Polymeric nanoparticles as an alternative for application of gibberellic acid in sustainable agriculture: a field study. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, no. 1, art. 7135 (1–10). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43494-y>

7. Pereira A. E. S., Sandoval-Herrera I. E., Zavala-Betancourt S. A., Oliveira H. C., Ledezma-Pérez A. S., Romero J., Fraceto L. F. γ -Polyglutamic acid/chitosan nanoparticles for the plant growth regulator gibberellic acid: Characterization and evaluation of biological activity. *Carbohydrate Polymers*, 2017, vol. 157, pp. 1862–1873. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.073>

8. Dzhus M. A., Molchan O. V., Kuhareva L. V., Spiridovich E. V., Jurin V. M. Distribution and ecological-coenotic characteristics of species of the genus *Vinca* L. in the flora of Belarus. *Ukrainskii botanicheskii zhurnal = Ukrainian Botanical Journal*, 2009, vol. 66, pp. 783–793 (in Russian).

9. Jurin V. M., Molchan O. V. Nanomaterials and plants: look at the problem. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Fiziologicheskie, biokhimicheskie i molekulyarnye osnovy funktsionirovaniya biosistem"* [Proceedings of the Belarusian State University. Series "Physiological, biochemical and molecular fundamentals of the functioning of biosystems"], 2015, vol. 10, no. 1, pp. 9–21 (in Russian).

10. Molchan O. V., Zaprudskaya E. V., Kudelina T. N. Effect of fullereneol on growth and the content of photosynthetic pigments in barley seedlings. *Botanika (issledovaniya)* [Botany (research)]. Minsk, 2017, vol. 46, pp. 224–232 (in Russian).

11. Kraskouski A. N., Hileuskaya K. S., Kulikouskaya V. I., Agabekov V. E. Synthesis and properties of calcium pectinate nanoparticles. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2014, no. 1, pp. 51–56 (in Russian).

Информация об авторах

Красковский Александр Николаевич – науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: aleks.kraskovsky@gmail.com.

Куликовская Виктория Игоревна – канд. хим. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kulikouskaya@gmail.com.

Молчан Ольга Викторовна – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga_molchan@mail.ru.

Information about the authors

Kraskouski Aliaksandr M. – Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aleks.kraskovsky@gmail.com.

Kulikouskaya Viktoryia I. – Ph. D. (Chemistry), Associate professor, Head of the Laboratory. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kulikouskaya@gmail.com.

Molchan Olga V. – Ph. D. (Biology), Associate professor, Head of the Laboratory. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga_molchan@mail.ru.

Гилевская Ксения Сергеевна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник, доцент. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: k_hilevskay@mail.ru.

Юрин Владимир Михайлович – д-р биол. наук, профессор. Белорусский государственный университет (пр-т Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yurin@bsu.by.

Агабеков Владимир Енокович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ichnm@ichnm.basnet.by.

Hileuskaya Kseniya S. – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher, Associate professor. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: k_hilevskay@mail.ru.

Yurin Vladimir M. – D. Sc. (Biology), Professor. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yurin@bsu.by.

Agabekov Vladimir E. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ichnm@ichnm.basnet.by.