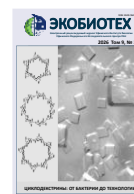




ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>

УДК 615.322:582.949.27:544.5:547.918



Научная статья | RESEARCH ARTICLE

β-ЦИКЛОДЕКСТРИН КАК СЕЛЕКТИВНЫЙ ЭКСТРАГЕНТ БИОАКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ТРАВЫ *THYMUS SERPYLLUM* L.

Головач Т.Н.^{1*}, Курченко В.П.¹, Лодыгин А.Д.²,
Гарибян Л.В.², Сисько А.А.¹¹ Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь² Северо-Кавказский федеральный университет,
Ставрополь, Россия*E-mail: halavachtn@gmail.com

β-CYCLODEXTRIN AS A SELECTIVE EXTRACTANT OF BIOACTIVE COMPOUNDS FROM *THYMUS SERPYLLUM* L. HERB

Halavach T.M.^{1*}, Kurchenko V.P.¹, Lodygin A.D.²,
Garibian L.V.², Sisko A.A.¹¹ Belarusian State University,
Minsk, Belarus² North-Caucasus Federal University,
Stavropol, Russia*E-mail: halavachtn@gmail.com

Аннотация

Представлено сравнительное исследование экстракционных систем для выделения биоактивных соединений из травы тимьяна ползучего (*Thymus serpyllum* L.): этанола как классического органического экстрагента и водного раствора β-циклодекстрина (β-ЦД) как экологически безопасной альтернативы. Обоснование выбора β-ЦД в качестве предпочтительного экстрагента базируется на его способности образовывать супрамолекулярные комплексы включения с гидрофобными и амфифильными молекулами, нетоксичности, биосовместимости и биоразлагаемости, что соответствует принципам устойчивой («зеленой») химии. Установлено, что химический профиль экстрактов определяется селективностью экстрагента к отдельным группам растительных метаболитов. Этанол преимущественно извлекал монотерпеновые фенолы (тимол – до 68.74%) и терпеноиды, а также отдельные липофильные компоненты, включая жирные кислоты и стеролы. Водный экстракт характеризовался накоплением полярных фенолпропаноидов, гетероциклических кетонов (мальтола и 4Н-пиран-4-она) и углеводных метаболитов. Для β-ЦД установлена селективность к жирным амидам (9-октадеценамид – 9.71%), ненасыщенным жирным кислотам и гетероциклическим кетонам. ЦД-экстракт превосходил водный контроль в 1.7 раза по выходу экстрактивных веществ, в 6.4 раза по содержанию фенолов и в 4.0 раза по антиоксидантной активности. Полученные результаты подтверждают перспективность β-ЦД как экологически безопасного экстрагента для направленного извлечения целевых групп биоактивных веществ из растительного сырья.

Ключевые слова:

Thymus serpyllum L., «зеленая» экстракция, β-циклодекстрин, супрамолекулярные комплексы включения, монотерпеновые фенолы, жирные амиды, антиоксидантная активность, газовая хроматография–масс-спектрометрия

Поступила в редакцию: 19.06.2026

Принято в печать: 28.08.2026

Abstract

A comparative study of extraction systems for the isolation of bioactive compounds from creeping thyme herb (*Thymus serpyllum* L.) is presented, comparing ethanol as a conventional organic extractant with an aqueous β-cyclodextrin (β-CD) solution as an environmentally friendly alternative. The rationale for selecting β-CD as a preferred extractant is based on its ability to form supramolecular inclusion complexes with hydrophobic and amphiphilic molecules, as well as its nontoxicity, biocompatibility, and biodegradability, which are consistent with the principles of sustainable (“green”) chemistry. The chemical profile of the extracts was determined by the selectivity of the extractant towards particular groups of plant metabolites. Ethanol predominantly extracted monoterpene phenols (thymol – up to 68.74%) and terpenoids, as well as individual lipophilic components, including fatty acids and sterols. The water extract was characterized by the accumulation of polar phenylpropanoids, heterocyclic ketones (maltol and 4H-pyran-4-one) and carbohydrate metabolites. The selectivity of β-CD towards fatty amides (9-octadecenamide, 9.71%), unsaturated fatty acids, and heterocyclic ketones was demonstrated. The CD-extract exceeded the water control by 1.7 times in the yield of extractive substances, 6.4 times in phenolic content, and 4.0 times in antioxidant activity. The obtained results confirm the potential of β-CD as an environmentally safe extractant for the selective recovery of target groups of bioactive compounds from plant raw materials.

Keywords:

Thymus serpyllum L., green extraction, β-cyclodextrin, supramolecular inclusion complexes, monoterpene phenols, fatty amides, antioxidant activity, gas chromatography–mass spectrometry

Received: 19.06.2026

Accepted: 28.08.2026

Цитировать | Cite as

DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-25> EDN: <https://www.elibrary.ru/dcztsq>

ВВЕДЕНИЕ

Тимьян ползучий (*Thymus serpyllum* L.) – фармакопейное лекарственное растение семейства *Lamiaceae*, широко применяемое в фитотерапии благодаря богатому составу биоактивных соединений. В его траве идентифицированы монотерпеновые фенолы (тимол, карвакрол), фенольные кислоты (розмариновая, сальвианоловая, кофейная), флавоноиды (гликозиды лютеолина, апигенина и их производные), а также жирные кислоты и терпеноиды, определяющие антиоксидантные, антимикробные и противовоспалительные свойства растения [Galovičová *et al.* 2021; Jalil *et al.* 2024]. Современные исследования подтверждают высокое содержание ценных метаболитов в *T. serpyllum*: доля эфирного масла достигает 1.12%, флавоноидов – 2.15%, дубильных веществ – 12.05% [Pyrukina *et al.* 2025]. При разработке технологии получения экстрактов принципиально важно учитывать не только общий выход экстрактивных веществ, но и способность растворителя направленно извлекать отдельные классы соединений.

Этанол является одним из наиболее распространенных экстрагентов в фитохимии благодаря способности извлекать широкий спектр гидрофобных и умеренно полярных веществ [Lefebvre *et al.* 2021]. Однако применение органических растворителей сопряжено с экологическими и технологическими ограничениями: необходимость многоступенчатой отгонки, потенциальная остаточная контаминация, неполная экстракция амфифильных соединений и деградация термолабильных полифенолов [Cao *et al.* 2025; Zalidis *et al.* 2025]. Водная экстракция, напротив, экологически безопасна, но характеризуется низкой селективностью к гидрофобным терпеноидам и стеролам [Wan Mohd Zamri *et al.* 2021].

В последние годы наблюдается активное развитие альтернативных экстракционных систем, основанных на принципах супрамолекулярной химии и экологически безопасных подходов [Shahbaz *et al.* 2025; Vadalà *et al.* 2025]. В соответствии с концепцией «зеленой» химии, устойчивый процесс направлен на сокращение количества отходов, использование возобновляемых и нетоксичных материалов, минимизацию энергозатрат и обеспечение экологической и социальной безопасности [Anastas, Warner 1998]. Наряду с водой и этанолом, в качестве альтернативных экстрагентов рассматривают глубокие эвтектические растворители [Paiva *et al.* 2014], ионные жидкости [Ventura *et al.* 2017], субкритическую воду и супрамолекулярные системы на основе циклодекстринов [Chemat *et al.* 2012].

Особый интерес представляет β-циклодекстрин (β-ЦД) – циклический гептасахарид с гидрофобной полостью диаметром 6.0–6.5 Å, способный образовывать комплексы включения типа «гость–хозяин» с гидрофобными и амфифильными соединениями [Sip *et al.* 2022; Radan *et al.* 2024; Nicolaescu *et al.* 2025]. Механизм экстракции с использованием β-ЦД принципиально отличается от классических растворителей и реализуется через супрамолекулярное комплексообразование: молекулы экстрагента инкапсулируют целевые компоненты в своей гидрофобной полости, что повышает их растворимость в водной среде и одновременно защищает от окислительной деградации [Christou *et al.* 2024]. К числу преимуществ β-ЦД как экологически безопасного экстрагента относятся нетоксичность, биоразлагаемость, отсутствие остаточных органических растворителей в конечном продукте, возможность проведения экстракции в мягких условиях (водная среда, умеренные температуры), а также способность к одновременной экстракции и стабилизации лабильных биоактивных соединений [Arrais *et al.* 2023; Dorofte *et al.* 2024]. Согласно современным данным β-ЦД способствует увеличению извлечения флавоноидных гликозидов и повышению антиоксидантной активности экстрактов по сравнению с этанольными вытяжками [Eyiž, Asar 2026]. В ряде работ установлено, что циклодекстрин-ассистированная экстракция является эффективным подходом для извлечения полифенолов из растительного сырья [Kuzmanović Nedeljković *et al.* 2024; Jakupović *et al.* 2025; Tsitlakidou *et al.* 2026]. Систематическое исследование β-ЦД-экстракции остатков после отгона розмарина (*Rosmarinus officinalis* L.) показало, что применение циклодекстринов позволяет получать экстракты, не уступающие по антиоксидантной активности классическим вариантам с этанолом [Tsitlakidou *et al.* 2026]. Наряду с этим использование β-ЦД в сочетании с ультразвуковым воздействием приводит к значительному повышению выхода биоактивных соединений из фитосубстратов [Jakupović *et al.* 2025]. Применение гидроксипропил-β-ЦД в смеси с глицерином обеспечивает эффективное извлечение фенольных соединений из растений семейства *Lamiaceae* [Kuzmanović Nedeljković *et al.* 2024].

С учетом известных данных по составу фитоэкстрактов *T. serpyllum* особую важность приобретает сопоставление групп соединений, преимущественно извлекаемых в различных

экстракционных системах. Несмотря на обширность литературных данных по экстракции БАВ из растений семейства *Lamiaceae*, систематическое сравнительное исследование экстракционной способности β-ЦД по отношению к различным группам метаболитов *T. serpyllum* ранее не проводилось. Новизна работы заключается в комплексном сопоставлении компонентных профилей, содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности экстрактов из травы *T. serpyllum*, полученных с использованием как классического органического растворителя (этанол), так и альтернативного экологически безопасного экстрагента (водный раствор β-ЦД).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Реактивы и материалы. В качестве объекта исследований использовали высушенную траву *T. serpyllum* производства ООО «НПК Биотест» (Беларусь). Для классической экстракции применяли этанол с объемной долей основного вещества 96.0% (Реахим, Россия). В качестве экологически безопасной альтернативы использовали 0.5%-й водный раствор β-ЦД. В работе применяли β-ЦД марки Kleptose® (Roquette, Франция) с массовой долей основного вещества ≥98.0%. Выбор 0.5%-й концентрации данного реагента основан на литературных источниках, согласно которым применение циклодекстринов в качестве экстракционных агентов позволяет повысить содержание извлекаемых фенольных соединений и биоактивность экстрактов [Sip *et al.* 2022; Radan *et al.* 2024; Nicolaescu *et al.* 2025], а оптимизированные протоколы экстракции демонстрируют высокую эффективность в диапазоне концентраций, близких к выбранной [Christou *et al.* 2024; Dorofte *et al.* 2024; Kuzmanović Nedeljković *et al.* 2024; Jakupović *et al.* 2025; Eyiz, Acar 2026; Tsitlakidou *et al.* 2026]. Контролем служила водная экстракция; для приготовления растворов использовали дистиллированную воду.

Условия экстракции. Экстракцию этанолом проводили методом мацерации при температуре 20–25°C. К навеске сухого растительного сырья массой 2.0 г добавляли 18.0 мл этанола (соотношение твердой и жидкой фаз 1:9, мас./об.) и выдерживали в течение 24 ч. Выбор условий этанольной экстракции основан на стандартной методике мацерации, широко применяемой в фитохимии для извлечения гидрофобных и умеренно полярных соединений [Lefebvre *et al.* 2021]. После завершения процесса жидкую фазу отделяли фильтрованием через бумажный фильтр. В случае экстракции водой и 0.5%-м водным раствором β-ЦД навески сухого растительного сырья массой 2.0 г смешивали с 40 мл соответствующего экстрагента (соотношение твердой и жидкой фаз 1:20, мас./об.) и инкубировали при температуре 45°C в течение 2 ч в термостатируемом шейкере (120 об/мин). Выбор температуры 45°C, времени экстракции 2 ч и соотношения фаз 1:20 основан на литературных данных, согласно которым указанные параметры обеспечивают эффективное извлечение фенольных соединений из растительного сырья с использованием ЦД, а более высокие температуры и длительное время не приводят к значимому увеличению выхода, но могут вызывать деградацию термолабильных соединений [Sip *et al.* 2022; Christou *et al.* 2024; Tsitlakidou *et al.* 2026]. На заключительном этапе образцы последовательно фильтровали через синтетическое волокно и бумажный фильтр, после чего подвергали лиофильной сушке. Выход сухого лиофилизированного экстракта рассчитывали гравиметрически (согласно ГОСТ 15113.4–2021). Общее содержание фенольных соединений устанавливали в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14502–1–2010. Для исключения возможного влияния примесей экстрагентов на результаты идентификации соединений проводили анализ холостой пробы. Для этого 0.5%-й раствор β-ЦД без растительного сырья обрабатывали по той же схеме, что и опытные образцы. Полученный лиофилизат анализировали методом ГХ–МС в тех же условиях, что и экстракты.

Определение антиоксидантной активности (ABTS-метод). Антиоксидантную активность (АОА) оценивали по способности образцов экстрактов восстанавливать катион-радикал на основе 2,2'-азино-бис(3-этилбензтиазолин-6-сульфоновой кислоты (ABTS^{•+}) с использованием модифицированного метода, описанного в работе Aarland *et al.* (2017) [Aarland *et al.* 2017]. Генерацию катион-радикала осуществляли путем окисления 7 мМ раствора ABTS 2.45 мМ раствором персульфата калия в защищенном от света месте при температуре (25±2)°C в течение 16 ч. Полученный раствор разбавляли до достижения оптической плотности 0.70±0.02 при длине волны 734 нм. К 1.0 мл разбавленного раствора ABTS^{•+} добавляли 0.1 мл экстракта, инкубировали в отсутствие света при температуре (25±2)°C в течение 10 мин и измеряли оптическую плотность при длине волны 734 нм. В качестве стандарта использовали тролокс (водорастворимый аналог

витамина Е) в диапазоне концентраций 0–20 мкМ. Результаты выражали в ммоль эквивалента тролокса на мл экстракта (ммоль тролокс-экв./мл).

ГХ–МС-анализ компонентного состава экстрактов. Компонентный состав экстрактов анализировали методом газовой хроматографии–масс-спектрометрии (ГХ–МС) с применением системы Agilent 6850 с масс-селективным детектором Agilent 5975B (Agilent Technologies, США). Для анализа лиофилизированные экстракты растворяли в метаноле (квалификация «ос.ч.») при соотношении 1:10 (мас./об.). Полученные растворы фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм. Хроматографическое разделение проводили на капиллярной колонке DB-5MS (5% Phenyl Methyl Siloxane, J&W 122–5062; Agilent Technologies, США). Газом-носителем служил гелий (чистота 99.999 %) при постоянном потоке 1.0 мл/мин. Объем вводимой пробы составлял 1 мкл (сплит 70:1). Температурная программа: начальная температура 35°C, нагрев до 280°C, общая продолжительность анализа – 60 мин. Масс-селективное детектирование выполняли при температуре источника ионов 230°C и температуре квадруполя 150°C. Идентификацию соединений проводили путем сравнения масс-спектров с библиотекой NIST 05 (National Institute of Standards and Technology, США). Идентифицированными считали соединения с коэффициентом совпадения не менее 85%. Количественный анализ осуществляли методом нормализации площадей пиков; результаты выражали в процентах от суммы площадей всех идентифицированных пиков. Идентификацию жирных кислот проводили без предварительной дериватизации на основании совпадения масс-спектров с библиотечными данными NIST 05. Для построения тепловых карт соединений, выявленных в экстрактах по результатам ГХ–МС, применяли онлайн инструмент ClustVis [Metsalu, Vilo 2015].

Статистическую обработку результатов выполняли методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим применением критерия Тьюки (Tukey's HSD) для множественных попарных сравнений при уровне значимости $p < 0.05$. Статистический анализ проводили с использованием программного обеспечения R (версия 4.2.1, R Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия) с пакетами *stats* и *DescTools*. Результаты расчетов отражены как среднее арифметическое значение $\pm$ половина ширины 95%-го доверительного интервала ($n = 3$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

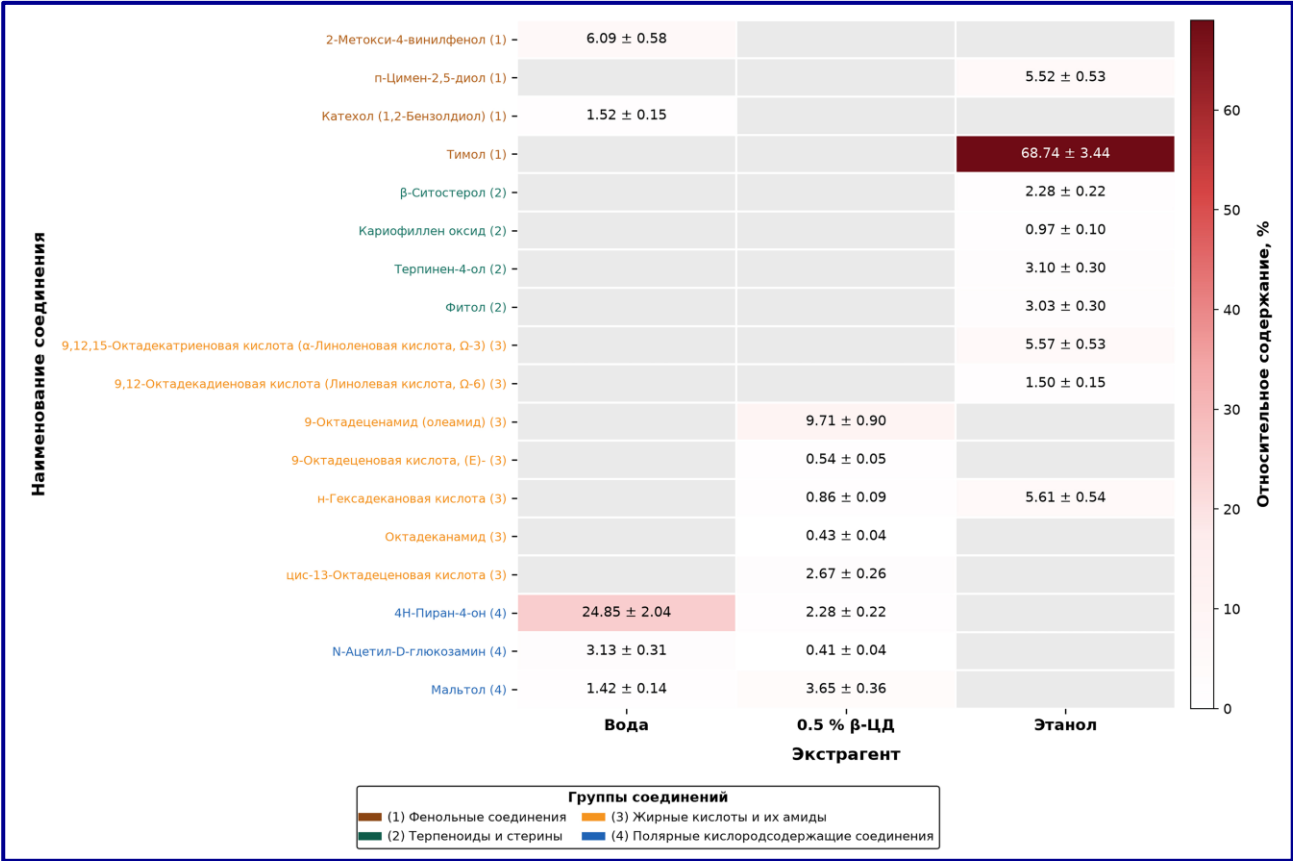
Детализированный анализ компонентного состава экстрактов показал, что исследованные экстракционные системы формируют отчетливо дифференцирующиеся химические профили – как на уровне индивидуальных соединений, так и на уровне групп метаболитов. По данным тепловой карты, представленной на Рис. 1, этанольный экстракт характеризовался максимальным содержанием монотерпенового фенола тимола (68.74%), а также присутствием п-цимен-2,5-диола (5.52%), терпинен-4-ола (3.1%), оксида кариофиллена (0.97%) и фитола (3.03%). Дополнительно этанол эффективно извлекал жирнокислотные и стерольные компоненты – пальмитиновую кислоту (5.61%), α -линоленовую кислоту (5.57%), линолевую кислоту (1.5%) и β -ситостерол (2.28%). Выявленное распределение подтверждает пригодность этанола для извлечения эфиромасличной и липофильной фракции тимьяна, чем объясняется его традиционное использование при получении антимикробных и противовоспалительных фитопрепаратов [Galovičová *et al.* 2021; Jalil *et al.* 2024]. Важно отметить, что тимол и продукты его биотрансформации обладают выраженной AOA [Favre *et al.* 2018], а образование комплексов тимола с β -ЦД повышает стабильность и биодоступность этого монотерпена без потери его радикал-связывающей способности [Miguel *et al.* 2010]. Это указывает на потенциальную комплементарность двух исследованных систем при совместном использовании и определяет направление для дальнейших исследований.

Водный экстракт преимущественно концентрировал полярные соединения: 2-метокси-4-винилфенол (6.09%), катехол (1,2-бензолдиол, 1.52%), N-ацетил-D-глюкозамин (3.13%), мальтол (1.42%) и 4Н-пиран-4-он (24.85%). Отсутствие тимола и других терпеновых компонентов в водном экстракте указывает на ограниченность водной мацерации в отношении гидрофобных эфиромасличных веществ, но при этом подтверждает ее избирательность к фенолпропаноидам, гетероциклическим кетонам (мальтолу и его производным) и углеводным метаболитам.

Экстракт, полученный с использованием 0.5%-го раствора β -ЦД, отличался специфическим профилем по сравнению с этанольным экстрактом и водным контролем. Для него характерно накопление олеамида (9.71%), цис-13-октадеценовой кислоты (2.67%), 9-октадеценовой кислоты (0.54%), н-гексадекановой кислоты (0.86%), октадеканамида (0.43%) и мальтола (3.65%) наряду

с наличием 4Н-пиран-4-она (2.28%) и N-ацетил-D-глюкозамина (0.41%). Особый интерес представляет селективность β-ЦД к жирным амидам, поскольку это открывает возможности для направленного извлечения данной группы соединений. Олеамид – эндогенный липидный медиатор с описанной гиполипидемической, антипролиферативной и модулирующей активностью в отношении центральной нервной системы [Park *et al.* 2025]. Его накопление в ЦД-экстракте, очевидно, обусловлено способностью гидрофобной полости β-ЦД избирательно инкапсулировать амфифильные амиды жирных кислот, повышая их извлекаемость и защищая от гидролиза. Согласно известным данным [Kobayashi *et al.* 2022] олеамид транспортируется из кишечника в периферические ткани в свободной форме, а не в составе липопротеинов, что указывает на его высокую биодоступность и потенциальную физиологическую значимость при пероральном поступлении. Мальтол и 4Н-пиран-4-он, в свою очередь, обладают собственной антиоксидантной и хелатирующей активностью по отношению к ионам металлов переменной валентности [Kontoghiorghe 2025], что может вносить вклад в итоговый показатель АОА циклодекстринового экстракта независимо от содержания классических фенольных соединений.

Рисунок 1. Тепловая карта относительного содержания (%) индивидуальных химических соединений, выявленных в экстрактах из травы *T. serpyllum* при использовании воды, 0.5%-го раствора β-ЦД и этанола
Figure 1. Heat map of the relative content (%) of individual chemical compounds identified in extracts from *T. serpyllum* herb using water, 0.5% β-CD solution, and ethanol



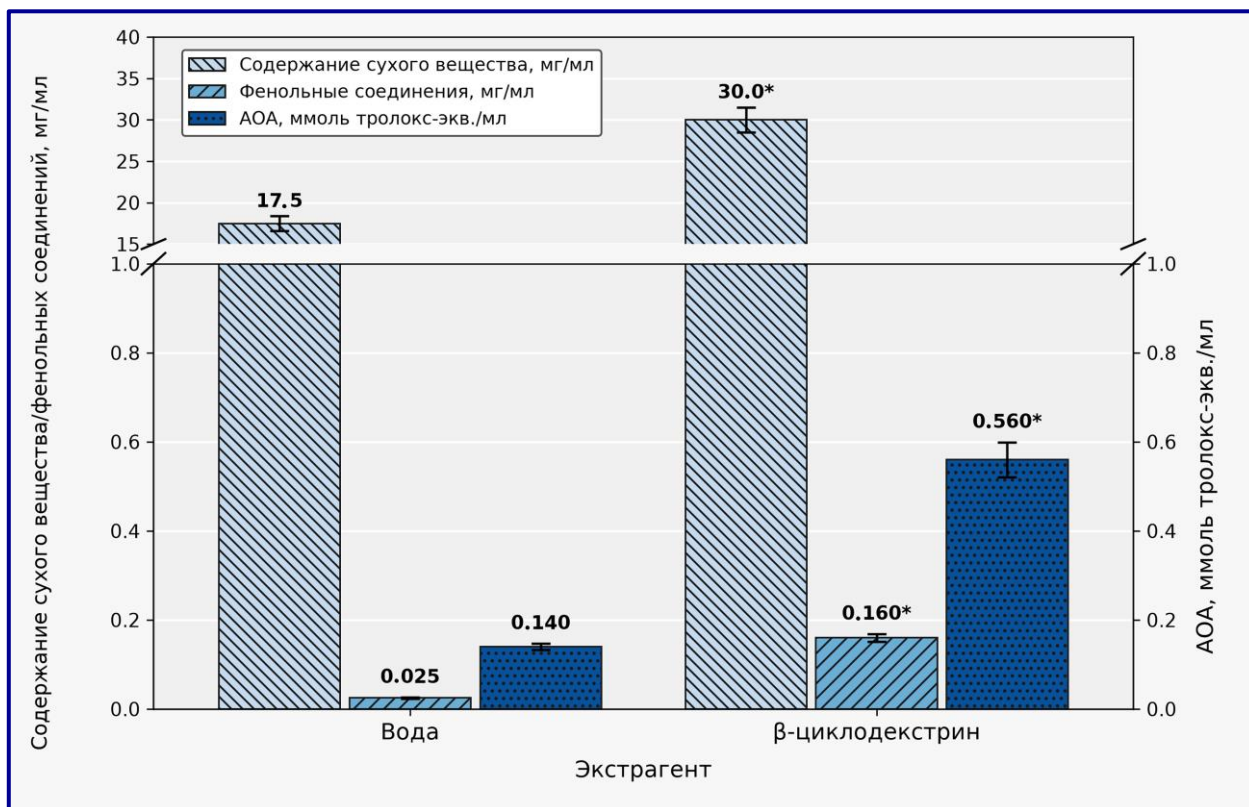
Сравнительный анализ профилей экстракции выявил характерную функциональную специализацию обсуждаемых систем. Этанол обеспечивает преимущественное извлечение монотерпеновых фенолов, терпеноидов, липофильных жирных кислот и стеролов. Водная мацерация, напротив, селективна к полярным фенилпропаноидам, сахаропроизводным и азотсодержащим метаболитам. β-ЦД-система характеризуется иным типом селективности, проявляя специфическую селективность к жирным амидам и оксигетероциклическим соединениям. Так, выбор экстрагента определяется целевым профилем конечного продукта: этанол предпочтителен для получения антимикробных эфиромасличных фракций [Galovičová *et al.* 2021; Jalil *et al.* 2024], тогда как β-ЦД перспективен для разработки экологически безопасных экстрактов с высокой антиоксидантной активностью, обогащенных биоактивными амидами и гетероциклическими соединениями.

В дополнение к анализу компонентного состава фитоэкстрактов на Рис. 2 представлены суммарные показатели экстракции водой и 0.5%-м раствором β -ЦД. Содержание сухого вещества в контрольном (водном) образце составило 17.5 мг/мл, тогда как в циклодекстриновом экстракте – 30.0 мг/мл, что свидетельствует о возрастании выхода экстрактивных веществ в 1.7 раза. Содержание фенольных соединений увеличилось с 0.025 до 0.160 мг/мл (в 6.4 раза), а антиоксидантная активность – с 0.140 до 0.560 ммоль тролокс-экв./мл (в 4.0 раза). Непропорциональный прирост АОА относительно увеличения содержания фенольных соединений согласуется с вкладом нефенольных антиоксидантов (мальтола и олеамида) в суммарный результат ABTS-теста.

Установленное в настоящей работе несоответствие между более значительным приростом содержания фенольных соединений (в 6.4 раза) и относительно меньшим увеличением антирадикального эффекта β -ЦД-образца (в 4.0 раза) согласуется с данными, полученными для β -ЦД-экстрактов послеотгонных остатков розмарина [Tsitlakidou *et al.* 2026], где также было показано, что антиоксидантная активность не определяется исключительно содержанием фенольных соединений и зависит от комплексного взаимодействия экстрагента с компонентами растительной матрицы. Это подтверждает вклад нефенольных компонентов (олеамида и гетероциклических кетонов) в формирование итогового показателя антиоксидантной активности β -ЦД-экстракта тимьяна и указывает на нелинейный характер связи между фенольным пулом и суммарным антирадикальным действием экстракта. Кроме того, полученные данные соответствуют описанному в литературе синергическому эффекту циклодекстринов, которые стабилизируют лабильные антиоксидантные метаболиты, предотвращая их окислительную деградацию как на этапе экстракции, так и при последующей лиофилизации [Sip *et al.* 2022; Christou *et al.* 2024]. Прямое количественное сопоставление уровня АОА трех систем некорректно из-за различий в условиях экстракции, поэтому данные для этанольного экстракта не включены в данный анализ и требуют унификации параметров в последующих исследованиях.

Рисунок 2. Содержание сухого вещества, фенольных соединений и антиоксидантная активность экстрактов из травы *T. serpyllum* при использовании воды и 0.5%-го раствора β -циклодекстрина – различия по сравнению с водным экстрактом достоверны при $p < 0.05$

Figure 2. Dry matter content, phenolic compound content, and antioxidant activity of extracts from *T. serpyllum* herb using water and 0.5% β -cyclodextrin solution – differences compared to the aqueous extract are significant at $p < 0.05$



Полученные результаты в целом подтверждают, что применение β-ЦД позволяет не только изменять качественный профиль извлекаемых соединений по сравнению с водной экстракцией, но и повышает общую эффективность выделения фитокомпонентов, обладающих собственной антиоксидантной и потенциальной физиологической активностью (олеамид, мальтол). Наблюдаемое сочетание повышенного выхода экстрактивных веществ и выраженной АОА отражает специфический механизм действия β-ЦД, реализуемый через супрамолекулярное комплексообразование с включаемыми в гидрофобную полость соединениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что специфичность экстракции биоактивных соединений из травы *T. serpyllum* определяется химической природой экстрагента и проявляется в селективном извлечении различных групп метаболитов. Этанол, как классический органический растворитель, наиболее эффективно извлекал монотерпеновые фенолы (тимол – до 68.74%), терпеноиды, а также липофильные жирные кислоты и стеролы, что подтверждает его пригодность для получения эфиромасличных антимикробных фракций. Водная мацерация, напротив, была селективна к полярным фенилпропаноидам (2-метокси-4-винилфенол), гетероциклическим кетонам (мальтол и 4Н-пиран-4-он) и углеводным метаболитам (N-ацетил-D-глюкозамин), но не обеспечивала извлечения гидрофобных терпеновых компонентов.

Применение 0.5%-го водного раствора β-ЦД позволило получить экстракт с качественно иным профилем: в нем доминировали жирные амиды (олеамид – 9.71%), ненасыщенные жирные кислоты и гетероциклические кетоны (мальтол и 4Н-пиран-4-он). Избирательное связывание β-ЦД жирных амидов, обладающих физиологической активностью, позволяет целенаправленно извлекать данную группу соединений. По сравнению с водным контролем ЦД-экстракт характеризовался повышенным выходом сухого вещества (в 1.7 раза), содержания фенольных соединений (в 6.4 раза) и антиоксидантной активности (в 4.0 раза), что обусловлено как вкладом нефенольных антиоксидантов (мальтола и олеамида), так и стабилизирующим действием циклодекстринов, предотвращающим окислительную деградацию лабильных метаболитов.

Таким образом, водный раствор β-ЦД представляет собой перспективный экологически безопасный экстрагент для улучшения водной экстракции, однако не является прямым аналогом этанола ввиду различий в избираемых группах соединений. Применение β-ЦД наиболее целесообразно при разработке функциональных ингредиентов и фитокомпозиций, где требуется исключить следы органических растворителей, сохранив высокую антиоксидантную активность конечного продукта. Представленные результаты обосновывают дифференцированный подход к выбору экстракционной системы в зависимости от целевого назначения фитопрепарата и открывают перспективы для дальнейшей оптимизации условий экстракции с целью максимальной реализации биоактивного потенциала растительного сырья.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Aarland R.C., Bañuelos-Hernández A.E., Fragoso-Serrano M., Sierra-Palacios E. del C., Díaz de León-Sánchez F., Pérez-Flores L.J., Rivera-Cabrera F., Mendoza-Espinoza J.A. (2017) Studies on phytochemical, antioxidant, anti-inflammatory, hypoglycaemic and antiproliferative activities of *Echinacea purpurea* and *Echinacea angustifolia* extracts. *Pharmaceutical Biology*. **55**(1): 649–656. <https://doi.org/10.1080/13880209.2016.1265989>
- Anastas P.T., Warner J.C. (1998) Green chemistry: theory and practice. Oxford University Press. New York: 135.
- Arrais A., Bona E., Todeschini V., Caramaschi A., Massa N., Roncoli M., Minervi A., Perin E., Gianotti V. (2023) *Thymus vulgaris* essential oil in beta-cyclodextrin for solid-state pharmaceutical

- applications. *Pharmaceutics*. **15**(3): 914. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030914> EDN: HZKZOU
- Cao S., Liang J., Chen M., Xu C., Wang X., Qiu L., Zhao X., Hu W. (2025) Comparative analysis of extraction technologies for plant extracts and absolutes. *Frontiers in Chemistry*. **13**. <https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1536590> EDN: OPORBO
- Chemat F., Vian M.A., Cravotto G. (2012) Green extraction of natural products: Concept and principles. *International Journal of Molecular Sciences*. **13**(7): 8615–8627. <https://doi.org/10.3390/ijms13078615>
- Christou A., Parisis N.A., Tzakos A.G., Gerothanassis I.P., Goulas V. (2024) Optimization of β -cyclodextrin based ultrasound-assisted extraction: A green strategy to enhance the extraction of bioactive compounds from taro leaf byproduct. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. **41**: 101728. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101728> EDN: YYSABB
- Dorofte A.L., Dima C., Bleoanca I., Aprodu I., Alexe P., Kharazmi M.S., Jafari S.M., Dima Ștefan, Borda D. (2024) Mechanism of β -cyclodextrin - thyme nanocomplex formation and release: In silico behavior, structural and functional properties. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. **7**: 100422. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100422> EDN: MJNVWU
- Eyіз V., Acar A. (2026) Synergistic green extraction of elderberry bioactives using glycerol and β -cyclodextrin as sustainable solvents. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. **49**: 102320. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2026.102320> EDN: VWNJHD
- Favre L.C., dos Santos C., López-Fernández M.P., Mazzobre M.F., Buera M. del P. (2018) Optimization of β -cyclodextrin-based extraction of antioxidant and anti-browning activities from thyme leaves by response surface methodology. *Food Chemistry*. **265**: 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.078>
- Galovičová L., Borotová P., Valková V., Vukovic N.L., Vukic M., Terentjeva M., Štefániková J., Ďúranová H., Kowalczewski P.L., Kačániová M. (2021) *Thymus serpyllum* essential oil and its biological activity as a modern food preserver. *Plants*. **10**(7): 1416. <https://doi.org/10.3390/plants10071416> EDN: DEMFFZ
- Jakupović L., Strawa J.W., Nižić Nodilo L., Marijan M., Hafner A., Jakimiuk K., Tomczykowa M., Tomczyk M., Končić M.Z. (2025) Cosmeceutical and wound-healing activities of green hydroxypropyl- β -cyclodextrin-glycerol-based *Satureja montana* extracts. *Molecules*. **30**(12): 2638. <https://doi.org/10.3390/molecules30122638> EDN: DWKHMS
- Jalil B., Pischel I., Feistel B., Suarez C., Blainski A., Spreemann R., Roth-Ehrang R., Heinrich M. (2024) Wild thyme (*Thymus serpyllum* L.): a review of the current evidence of nutritional and preventive health benefits*. *Frontiers in Nutrition*. **11**. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1380962> EDN: SVGTDL
- Kobayashi Y., Watanabe N., Hiura R., Kubota M., Furuta K., Sugimoto K., Murota K., Nakamura E., Matsuura T., Kai K. et al. (2022) Transport form and pathway from the intestine to the peripheral tissues and the intestinal absorption and metabolism properties of oleamide. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. **70**(49): 15499–15508. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c06791> EDN: ERFMUW
- Kontoghiorghes G.J. (2025) Development of iron-chelating/antioxidant nutraceuticals and natural products as pharmaceuticals for clinical use in diseases with free radical pathologies. *Nutrients*. **17**(20): 3270. <https://doi.org/10.3390/nu17203270> EDN: QYXRMO
- Kuzmanović Nedeljković S., Radan M., Bigović D., Šavikin K. (2024) Cyclodextrin-aided green extraction from *Fagopyrum esculentum* Moench – an effective strategy for the sustainable recovery of polyphenols. *Lekovite Sirovine*. **44**(1). <https://doi.org/10.61652/leksir2444012k>
- Lefebvre T., Destandau E., Lesellier E. (2021) Selective extraction of bioactive compounds from plants using recent extraction techniques: A review. *Journal of Chromatography A*. **1635**: 461770. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461770> EDN: INLXZE
- Metsalu T., Vilo J. (2015) ClustVis: a web tool for visualizing clustering of multivariate data using Principal Component Analysis and heatmap. *Nucleic Acids Research*. **43**(W1): W566–W570. <https://doi.org/10.1093/nar/gkv468>
- Miguel M.G., Dandlen S.A., Figueiredo A.C., Pedro L.G., Barroso J.G., Marques M.H. (2010) Comparative evaluation of the antioxidant activities of thymol and carvacrol and the corresponding β -cyclodextrin complexes. *Acta Horticulturae*. (853): 363–368. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.853.44>

- Nicolaescu O.E., Belu I., Mocanu A.G., Manda V.C., Rău G., Pîrnu 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
- Paiva A., Craveiro R., Aroso I., Martins M., Reis R.L., Duarte A.R.C. (2014) Natural deep eutectic solvents –solvents for the 21st century. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. **2**(5): 1063–1071. <https://doi.org/10.1021/sc500096j>
- Park C.K., Choi S.J., Kim C.R., Shin H.R., Shin E.-C., Kim Y.J., Cho T.J., Shin D.-H., Kim J.K. (2025) Ethanolic extract of *Rosa rugosa* roots and its bioactive compound, oleamide, prevented amyloid β-induced oxidative stress and improved behavioral tests in mice. *International Journal of Molecular Sciences*. **26**(9): 4214. <https://doi.org/10.3390/ijms26094214> EDN: NZSTPE
- Pupykina K.A., Anishchenko I.E., Krasnyuk E. V., Zhigunov O.Yu., Shigapov Z.Kh. (2025) To the biochemistry of some representatives of the genus *Thymus* L. under the culture. *Agricultural Science Euro-North-East*. **26**(6): 1263–1271. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.6.1263-1271> EDN: UBVPYQ
- Radan M., Jovanović M., Čujić Nikolić N., Mudrić J., Janković T., Bigović D., Šavikin K. (2024) Cyclodextrin-assisted extraction as a green alternative for the recovery of phenolic compounds from *Helichrysum plicatum* DC. flowers. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. **39**: 101547. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101547> EDN: NMGMYO
- Shahbaz M., Riaz M., Momal U., Rasool I.F.U., Naeem H., Raza N., Moreno A., Khalid W., Esatbeyoglu T. (2025) Green solvent extraction and eco-friendly novel techniques of bioactive compounds from plant waste: Applications, future perspective and circular economy. *Applied Food Research*. **5**(2): 101434. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101434> EDN: YKZKSV
- Sip S., Gościński A., Szulc P., Walkowiak J., Cielecka-Piontek J. (2022) Assisted extraction with cyclodextrins as a way of improving the antidiabetic activity of *Actinidia* leaves. *Pharmaceutics*. **14**(11): 2473. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14112473> EDN: RIFUZK
- Tsitlakidou P., Deligiannidou G.-E., Bussi A., Kontogiorgis C., Biliaderis C.G., Mourtzinis I. (2026) Cyclodextrins-assisted extraction for the recovery of bioactive compounds from rosemary post-distillation residues—*in vitro* antioxidant activity, comparisons to conventional liquid extracts. *Foods*. **15**(4): 627. <https://doi.org/10.3390/foods15040627> EDN: NMURCN
- Vadalà R., Costa R., Cicero N. (2025) Special issue: “Advances in sources, extraction, encapsulation, bioavailability, and health benefits of functional food ingredients.” *Foods*. **14**(5): 759. <https://doi.org/10.3390/foods14050759> EDN: MFFTID
- Ventura S.P.M., e Silva F.A., Quental M. V., Mondal D., Freire M.G., Coutinho J.A.P. (2017) Ionic-liquid-mediated extraction and separation processes for bioactive compounds: past, present, and future trends. *Chemical Reviews*. **117**(10): 6984–7052. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00550> EDN: YGYOZX
- Wan Mohd Zamri W.M.I., Sjahrir F., Yaacob N.S., Dzulkafli N.F., Ahmad M.F., Abdullah H., Maniyam M.N., Hashim E.F., Kawasaki N., Komatsu K. et al. (2021) Assessment of aqueous extraction methods on extractable organic matter and hydrophobic/hydrophilic fractions of virgin forest soils. *Molecules*. **26**(9): 2480. <https://doi.org/10.3390/molecules26092480> EDN: CJEBFO
- Zalidis A.P., Tsakiridis N., Zalidis G., Mourtzinis I., Gkatzionis K. (2025) Evaluating the effect of thermal treatment on phenolic compounds in functional flours using Vis–NIR–SWIR spectroscopy: a machine learning approach. *Foods*. **14**(15): 2663. <https://doi.org/10.3390/foods14152663> EDN: JCRBDV

Цитировать как

Головач Т.Н., Курченко В.П., Лодыгин А.Д., Гарибян Л.В., Сисько А.А. (2026). β-циклодекстрин как селективный экстрагент биоактивных соединений из травы *Thymus serpyllum* L. *Экобиотех*. **9**(3): 335-344. DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-25> EDN: <https://www.elibrary.ru/dcztsq>

Cited as

Halavach T.M., Kurchenko V.P., Lodygin A.D., Garibian L.V., Sisko A.A. (2026). β-cyclodextrin as a selective extractant of bioactive compounds from *Thymus serpyllum* L. herb. *Ecobiotech*. **9**(3): 335-344. DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-25> EDN: <https://www.elibrary.ru/dcztsq>

Сведения об авторах

Татьяна Николаевна Головач, к.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладных проблем биологии, биологический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь. E-mail: halavachtn@gmail.com, [SPIN: 2133-1933](#), [WoS Researcher ID: AAE-7947-2021](#), [ORCID: 0000-0002-2096-8030](#), [Scopus Author ID: 57190978534](#).

Владимир Петрович Курченко, к.б.н., доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией прикладных проблем биологии, биологический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь. E-mail: kurchenko@bsu.by, [SPIN: 6118-6385](#), [WoS Researcher ID: AAC-6642-2022](#), [ORCID: 0000-0002-4859-2389](#), [Scopus Author ID: 6603704011](#).

Алексей Дмитриевич Лодыгин, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой прикладной биотехнологии, факультет пищевой инженерии и биотехнологий, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия. E-mail: allodygin@yandex.ru, [SPIN: 2039-7644](#), [WoS Researcher ID: AAC-2953-2022](#), [ORCID: 0000-0001-8460-2954](#), [Scopus Author ID: 57021535400](#).

Лиана Валериковна Гарибян, аспирант кафедры прикладной биотехнологии, факультет пищевой инженерии и биотехнологий, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия. E-mail: liana.garibian@gmail.com, [SPIN: 1788-4150](#), [ORCID: 0009-0001-5153-0373](#).

Антон Александрович Сисько, студент кафедры общей экологии и методики преподавания биологии, биологический факультет, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь. E-mail: bio.sisko@bsu.by.

Information About the Authors

Tatsiana M. Halavach, PhD (Biology), Associate Professor, Leading Researcher of the Research Laboratory of Applied Biology, Faculty of Biology, Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: halavachtn@gmail.com, [SPIN: 2133-1933](#), [WoS Researcher ID: AAE-7947-2021](#), [ORCID: 0000-0002-2096-8030](#), [Scopus Author ID: 57190978534](#).

Vladimir P. Kurchenko, PhD (Biology), Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Applied Biology, Faculty of Biology, Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: kurchenko@bsu.by, [SPIN: 6118-6385](#), [WoS Researcher ID: AAC-6642-2022](#), [ORCID: 0000-0002-4859-2389](#), [Scopus Author ID: 6603704011](#).

Alexey D. Lodygin, Doctor (Technical Sciences), Associate Professor, Head of the Department of Applied Biotechnology, Faculty of Food Engineering and Biotechnologies, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia. E-mail: allodygin@yandex.ru, [SPIN: 2039-7644](#), [WoS Researcher ID: AAC-2953-2022](#), [ORCID: 0000-0001-8460-2954](#), [Scopus Author ID: 57021535400](#).

Liana V. Garibyan, Postgraduate Student of the Department of Applied Biotechnology, Faculty of Food Engineering and Biotechnologies, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia. E-mail: liana.garibian@gmail.com, [SPIN: 1788-4150](#), [ORCID: 0009-0001-5153-0373](#).

Anton A. Sisko, Student of the Department of General Ecology and Methods of Biology Teaching, Faculty of Biology, Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: bio.sisko@bsu.by.