

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 547.972;615.32
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-34-44>

Поступила в редакцию 22.05.2025
Received 22.05.2025

Е. В. Феськова¹, К. С. Сычик¹, О. С. Игнатовец¹, В. Н. Леонтьев¹, В. В. Титок²

¹Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

²Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КЕМПФЕРОЛА И ЕГО ГЛИКОЗИДОВ В ЭКСТРАКТАХ РАСТЕНИЙ МЕТОДОМ ВЭЖХ-МС

Аннотация. Представлены результаты идентификации кемпферола и его гликозидов в растительных экстрактах с использованием метода высокоэффективной хромато-масс-спектрометрии (ВЭЖХ-МС). Исследование направлено на подбор и оптимизацию хроматографических условий для эффективного разделения и идентификации данных флавоноидов, обладающих высокой биологической активностью, а также на поиск новых видов растительного сырья для фармацевтической отрасли Республики Беларусь. Совместное использование масс-спектрометрического и спектрофотометрического детектирования обеспечило высокую чувствительность и селективность при идентификации кемпферола и его гликозидов. Астралагин в количестве более 2,20 мг/г а. с. с. содержится в экстрактах *Asclepias incarnata* L., *Geranium pratense* L. и *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. ex DC. Идентифицированы также три гликозида кемпферола в составе *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. ex DC. и *Glycyrrhiza glabra* L. и два гликозида – в составе *Borago officinalis* L. Проведенное исследование демонстрирует эффективность метода ВЭЖХ-МС для анализа флавоноидов в многокомпонентных растительных матрицах и может быть использовано для контроля качества растительного сырья и в фармакогнозии.

Ключевые слова: кемпферол, астралагин, гликозиды кемпферола, агликон, идентификация, ВЭЖХ-МС, растительные экстракты

Для цитирования. Идентификация кемпферола и его гликозидов в экстрактах растений методом ВЭЖХ-МС / Е. В. Феськова, К. С. Сычик, О. С. Игнатовец [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2026. – Т. 62, № 1. – С. 34–44. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-34-44>

A. U. Feskova¹, K. S. Sychyk¹, O. S. Ignatovets¹, V. N. Leontiev¹, V. V. Titok²

¹Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

²Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

HPLC-MS KAEMFEROL AND ITS GLYCOSIDES IDENTIFICATION

Abstract. The article presents the results of kaempferol and its glycosides identification in plant extracts using the method of high-performance chromatography-mass spectrometry (HPLC-MS). The study is focused on the selection and optimization of chromatographic conditions for efficient separation and identification of these flavonoids with high biological activity, as well as at searching for new types of plant raw materials for the pharmaceutical industry of the Republic of Belarus. The use of the mass-spectrometric and spectrophotometric detection ensured high sensitivity and selectivity in the identification of kaempferol and its glycosides. Astragaline in an amount of more than 2.20 mg/g of absolutely dry raw material is contained in the extracts of *Asclepias incarnate* L., *Geranium pratense* L. and *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. ex DC. Three glycosides of kaempferol were also identified in *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. and *Glycyrrhiza glabra* L. extracts, and two glycosides – in the extracts of *Borago officinalis* L. The conducted study demonstrates the efficiency of the HPLC-MS method for analyzing flavonoids in multicomponent plant matrices and can be used for the quality control of plant raw materials and in pharmacognosy.

Keywords: kaempferol, astragaline, kaempferol glycosides, aglycone, identification, HPLC-MS, plant extracts

For citation. Feskova A. U., Sychyk K. S., Ignatovets O. S., Leontiev V. N., Titok V. V. HPLC-MS kaempferol and its glycosides identification. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2026, vol. 62, no. 1, pp. 34–44 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-1-34-44>

Введение. В последнее время все больше полифенольных соединений растительного происхождения используется для лечения и профилактики ряда заболеваний. Считается, что полифенолы в целом и флавоноиды в частности проявляют широкий спектр биологической активности (противоаллергическая, антибактериальная, противовоспалительная, противовирусная, антитромбическая, гепатопротекторная, антиоксидантная, противораковая и др.) [1].

Флавоноиды структурно разнообразны и являются наиболее распространенными полифенолами в рационе человека. Они в основном встречаются в форме гликозидов и ацилгликозидов, содержатся в луке, петрушке, ягодах, черном и зеленом чае, бананах, красном вине, всех цитрусовых, темном шоколаде (с содержанием какао-бобов 70 % и более) [1, 2].

Растительные флавоноиды в последние годы широко изучаются для возможного их применения при лечении рака из-за их повышенной биодоступности и лучшей переносимости по сравнению с синтетическими препаратами [3, 4]. Распространенность данного заболевания неуклонно растет и одной из проблем в его лечении является то, что раковые клетки могут вырабатывать устойчивость к различным методам лечения (химио- и радиотерапия, хирургия и др.), что может ослабить прогнозируемые результаты лечения.

Для лечения пациентов с раком требуются новые и альтернативные терапевтические методы. Исследования демонстрируют, что различные биологически активные вещества могут sensibilizировать опухолевые клетки к противоопухолевым препаратам, обращая вспять резистентность опухоли, уменьшать токсические эффекты при различных злокачественных процессах [4]. Так, многочисленные *in vitro* исследования в сочетании с исследованиями *ex vivo* продемонстрировали противораковое действие флавоноидов [3]. Следует отметить, что около 61 % противораковых и 49 % противинфекционных соединений были обнаружены в растительном сырье [1].

К флавоноидам с противоопухолевой активностью относятся кемпферол и его гликозиды, в частности астрагалин (кемпферол-3-О-β-D-глюкозид, кемпферол-3-О-β-D-глюкопиранозид).

Противораковая роль кемпферола и астрагалина была продемонстрирована при лечении рака пищевода, молочной железы, шейки матки, яичников, желудка, поджелудочной железы, мочевого пузыря, гепатоцеллюлярной карциноме, немелкоклеточном раке легких, лейкемии, остеосаркоме и др., а также при доброкачественных заболеваниях (миома матки) [1, 2, 5, 6]. Данные соединения обладают цитотоксической активностью только против раковых клеток, имеют ограниченную токсичность для здоровых клеток и могут регулировать различные процессы, связанные с заболеванием. Противоопухолевое действие кемпферола и астрагалина проявляется в способствовании апоптозу, ослаблении роста опухолевых клеток, индуцировании экспрессии апоптотических сигнальных белков, подавлении миграции и инвазии раковых клеток [3, 5, 6].

В настоящее время кемпферол и его гликозиды считаются потенциально значимыми при разработке лекарственных препаратов с цитотоксической активностью.

Природные источники кемпферола [7–9] и астрагалина [5, 9–13] представлены в табл. 1.

Таблица 1. Природные источники кемпферола и астрагалина

Table 1. Natural sources of kaempferol and astragalín

Источник кемпферола	Семейство	Источник астрагалина
<i>Acorus gramineus</i> Sol. Aiton (аир злаковый)	<i>Acoraceae</i> (Аироцветные)	Нет данных
<i>Actinidia valvata</i> Dunn (вид актинидии)	<i>Actinidiaceae</i> (Актинидиевые)	Нет данных
<i>Alternanthera tenella</i> Colla (альтернантера фикусовидная)	<i>Amaranthaceae</i> (Амарантовые)	<i>Chenopodium album</i> L. (марь белая)
<i>Allium cepa</i> L. (лук репчатый), <i>Allium neapolitanum</i> Cirillo (лук неаполитанский), <i>Allium porrum</i> L. (лук-порей), <i>Allium triquetrum</i> L. (лук трехгранный)	<i>Amaryllidaceae</i> (Амариллисовые)	<i>Allium ampeloprasum</i> L. (лук виноградный), <i>Allium ursinum</i> L. (лук медвежий, черемша), <i>Allium victorialis</i> L. (лук победный)
<i>Pistacia vera</i> L. (фисташка настоящая), <i>Toxicodendron vernicifluum</i> (Stokes) F. A. Barkley (токсикодендрон лаконосный)	<i>Anacardiaceae</i> (Анакардиевые)	<i>Toxicodendron vernicifluum</i> (Stokes) F. A. Barkley (токсикодендрон лаконосный)
<i>Ammi majus</i> L. (амми большая), <i>Bupleurum chinense</i> DC. (володушка китайская), <i>Bunium persicum</i> (Boiss.) V. Fedtsch. (бунимум персидский), <i>Centella asiatica</i> (L.) Urb. (центелла азиатская), <i>Foeniculum vulgare</i> Mill. (фенхель обыкновенный)	<i>Apiaceae</i> (Зонтичные)	<i>Centella asiatica</i> (L.) Urb. (центелла азиатская), <i>Ligusticum striatum</i> DC. (лигустикум полосатый), <i>Peucedanum alsaticum</i> L. (златогоричник эльзасский)

Продолжение табл. 1

Источник кемпферола	Семейство	Источник астрагалина
<i>Asclepias incarnata</i> L. (ваточник мясокрасный), <i>Asclepias syriaca</i> L. (ваточник сирийский), <i>Dipladenia martiana</i> (Stadelm.) A. DC. (дипладения мартиана)	<i>Apocynaceae</i> (Кутровые)	<i>Apocynum venetum</i> L. (кендырь синеватый), <i>Asclepias incarnata</i> L. (ваточник мясокрасный), <i>Asclepias syriaca</i> L. (ваточник сирийский), <i>Dipladenia martiana</i> (Stadelm.) A. DC. (дипладения мартиана), <i>Trachelospermum jasminoides</i> (Lindl.) Lem. (трахелоспермум жасминовидный)
Нет данных	<i>Araliaceae</i> (Аралиевые)	<i>Hedera helix</i> L. (плющ обыкновенный)
<i>Aloe vera</i> (L.) Burm.f. (алоэ настоящее)	<i>Asphodelaceae</i> (Асфоделовые)	Нет данных
<i>Carthamus tinctorius</i> L. (сафлор красильный), <i>Echinops echinatus</i> Roxb. (чертополох индийский), <i>Grindelia robusta</i> Nutt. (гринделия мощная), <i>Heterotheca inuloides</i> Cass. (арника мексиканская), <i>Lactuca scariola</i> L. (салат дикий), <i>Silphium perfoliatum</i> L. (сильфия продырявленная), <i>Solidago virgaurea</i> L. (золотарник обыкновенный)	<i>Asteraceae</i> (Астровые)	<i>Carthamus lanatus</i> L. (чертополох шерстистый), <i>Cichorium endivia</i> L. (цикорий салатный), <i>Eupatorium cannabinum</i> L. (посконник коноплевый), <i>Gynura procumbens</i> (Lour.) Merr. (гинура распростертая), <i>Helichrysum arenarium</i> (L.) Moench (бессмертник песчаный), <i>Solidago canadensis</i> L. (золотарник канадский)
<i>Impatiens balsamina</i> L. (недотрога бальзаминная), <i>Impatiens textori</i> Miq. (недотрога Текстора)	<i>Balsaminaceae</i> (Бальзаминные)	<i>Impatiens balsamina</i> L. (недотрога бальзаминная), <i>Impatiens textori</i> Miq. (недотрога Текстора)
<i>Dysosma versipellis</i> (Hance) M. Cheng (дисомна изменчивая)	<i>Berberidaceae</i> (Барбарисовые)	Нет данных
<i>Borago officinalis</i> L. (бурачник лекарственный)	<i>Boraginaceae</i> (Бурачниковые)	Нет данных
<i>Brassica campestris</i> L. (капуста полевая), <i>Brassica juncea</i> (L.) CZERN. (горчица сарептская), <i>Brassica oleracea</i> L. (капуста огородная), <i>Bunias orientalis</i> L. (свербига восточная), <i>Diploaxis erucoides</i> (L.) DC. (двурядка эруковидная), <i>Diploaxis tenuifolia</i> (L.) DC. (двурядка тонколистная), <i>Eruca sativa</i> Mill. (эрука посевная)	<i>Brassicaceae</i> (Капустные)	Нет данных
<i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Mill. (опунция индийская)	<i>Cactaceae</i> (Кактусовые)	Нет данных
Нет данных	<i>Campanulaceae</i> (Колокольчиковые)	<i>Campanula alliariifolia</i> Willd. (колокольчик чесночницелистный), <i>Campanula barbata</i> L. (колокольчик бородатый)
Нет данных	<i>Caryophyllaceae</i> (Гвоздичные)	<i>Dianthus barbatus</i> L. (гвоздика турецкая)
<i>Euonymus alatus</i> (Thunb.) Siebold (бересклет крылатый)	<i>Celastraceae</i> (Бересклетовые)	Нет данных
<i>Cuscuta australis</i> R.Br. (повилика австралийская), <i>Cuscuta chinensis</i> Lam. (повилика китайская)	<i>Convolvulaceae</i> (Вьюнковые)	<i>Cuscuta australis</i> R. Br. (повилика австралийская), <i>Cuscuta chinensis</i> Lam. (повилика китайская), <i>Ipomoea batatas</i> (L.) LAM. (батат)
<i>Alangium salviifolium</i> (L.f.) Wangerin (алангиум шалфейнолистный)	<i>Cornaceae</i> (Кизилые)	<i>Alangium salviifolium</i> (L.f.) Wangerin (алангиум шалфейнолистный)
<i>Kalanchoe fedtschenkoii</i> Raym.-Hamet & H. Perrier (каланхое Федченко), <i>Rhodiola rosea</i> L. (родиола розовая), <i>Rhodiola sachalinensis</i> Boriss. (родиола сахалинская)	<i>Crassulaceae</i> (Толстянковые)	Нет данных

Продолжение табл. 1

Источник кемпферола	Семейство	Источник астрагалина
<i>Gynostemma cardiospermum</i> Cogn. ex Oliv. (гиностемма сердцеплодная)	<i>Cucurbitaceae</i> (Тыквенные)	Нет данных
Нет данных	<i>Cyatheaceae</i> (Циатеиные)	<i>Alsophila spinulosa</i> (Wall. ex Hook.) R. M. Tryon (альшофила шиповидная)
Нет данных	<i>Dennstaedtiaceae</i> (Деннштедтиевые)	<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn (орляк обыкновенный)
<i>Diospyros lotus</i> L. (хурма кавказская)	<i>Ebenaceae</i> (Эбеновые)	<i>Diospyros kaki</i> Thunb. (хурма восточная)
<i>Hippophae rhamnoides</i> L. (облепиха крушино- видная)	<i>Elaeagnaceae</i> (Лоховые)	<i>Hippophae rhamnoides</i> L. (облепиха крушиновидная)
<i>Equisetum arvense</i> L. (хвощ полевой)	<i>Equisetaceae</i> (Хвощовые)	<i>Equisetum arvense</i> L. (хвощ полевой)
<i>Euphorbia aleppica</i> L. (молочай алеппийский)	<i>Euphorbiaceae</i> (Молочайные)	<i>Cnidioscolus aconitifolius</i> (Mill.) I. M. Johnst. (книдосколус аконитолистный), <i>Triadica sebifera</i> (L.) Small (сальное дерево)
<i>Acacia nilotica</i> (L.) Delile (акация нильская), <i>Galega officinalis</i> L. (галега лекарственная), <i>Glycyrrhiza</i> spp. (солодка), <i>Indigofera suffruticosa</i> Mill. (индигофера полукустарниковая), <i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierr (понгамия перистая), <i>Senna alexandrina</i> Mill. (сенна александрийская), <i>Senna siamea</i> (Lam.) Irwin et Barneby (сенна сиамская), <i>Styphnolobium japonicum</i> (L.) Schott (софора японская), <i>Tadehagi triquetrum</i> (L.) H. Ohashi (гадехаги трехгранный), <i>Trifolium alexandrinum</i> L. (клевер александрийский)	<i>Fabaceae</i> (Бобовые)	<i>Astragalus hamosus</i> L. (европейская молоч- ная вика), <i>Astragalus mongholicus</i> Bunge (астрагал пе- репончатый), <i>Biancaea decapetala</i> (Roth) O. Deg. (маври- кийский шип), <i>Glycyrrhiza glabra</i> L. (солодка голая), <i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch (солодка уральская), <i>Phaseolus vulgaris</i> L. (фасоль обыкновенная), <i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierr (понгамия пе- ристая), <i>Senna alata</i> (L.) Roxb. (сенна крылатая), <i>Tadehagi triquetrum</i> (L.) H. Ohashi (гадехаги трехгранный)
Нет данных	<i>Fagaceae</i> (Буковые)	<i>Quercus dentata</i> Thunb. (дуб зубчатый)
<i>Geranium carolinianum</i> L. (герань каролинская), <i>Geranium pretense</i> L. (герань луговая), <i>Pelargonium quercifolium</i> (L.f.) L'Hér. ex Aiton (пеларгония дуболистная)	<i>Geraniaceae</i> (Гераниевые)	Нет данных
<i>Ginkgo biloba</i> L. (гинкго Билоба)	<i>Ginkgoaceae</i> (Гинкговые)	<i>Ginkgo biloba</i> L. (гинкго Билоба)
<i>Hypericum brasiliense</i> Choisy (зверобой бразиль- ский), <i>Hypericum perforatum</i> L. (зверобой продыряв- ленный)	<i>Hypericaceae</i> (Зверобойные)	Нет данных
<i>Crocus sativus</i> L. (шафран посевной)	<i>Iridaceae</i> (Ирисовые)	Нет данных
<i>Origanum dictamnus</i> L. (душица критская)	<i>Lamiaceae</i> (Яснотковые)	<i>Dracocephalum peregrinum</i> L. (змееголовник иноземный), <i>Lamium album</i> L. (яснотка белая), <i>Phlomis caucasica</i> Rech.f. (зопник кавказский), <i>Phlomis spinidens</i> Nevski (зопник колючезубый)
Нет данных	<i>Lauraceae</i> (Лавровые)	<i>Lindera aggregata</i> (Sims) Kosterm. (линдера агрегата)
<i>Lilium candidum</i> L. (лилия белоснежная), <i>Lilium longiflorum</i> Thunb. (лилия длинноцветковая)	<i>Liliaceae</i> (Лилейные)	Нет данных
<i>Punica granatum</i> L. (гранат обыкновенный)	<i>Lythraceae</i> (Дербенниковые)	Нет данных
<i>Althaea rosea</i> L. (шток-роза розовая, мальва), <i>Tilia argentea</i> DESF. ex DC. (липа душистая), <i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Spreng.) K. Schum. (теоброма крупноцветковая), <i>Tilia tomentosa</i> Moench. (липа пушистая)	<i>Malvaceae</i> (Мальвовые)	<i>Abutilon grandifolium</i> (Willd.) Sweet (абутилон крупноцветковый), <i>Abutilon theophrasti</i> Medik. (канатник Теофраста), <i>Corchorus olitorius</i> L. (джут длиннолистный)

Продолжение табл. 1

Источник кемпферола	Семейство	Источник астрагалина
Нет данных	<i>Meliaceae</i> (Мелиевые)	<i>Aglaia cucullata</i> (Roxb.) Pellegr. (тихоокеанский клен)
<i>Cudrania tricuspidata</i> L. (кудрания триостренна)	<i>Moraceae</i> (Тутовые)	<i>Morus alba</i> L. (шелковица белая)
<i>Moringa oleifera</i> Lam. (моринга масличная)	<i>Moringaceae</i> (Моринговые)	<i>Moringa oleifera</i> Lam. (моринга масличная)
<i>Eucalyptus</i> spp. (эвкалипт), <i>Psidium guajava</i> L. (гуайява), <i>Syzygium aromaticum</i> (L.) Merr. & Perry (гвоздичное дерево)	<i>Myrtaceae</i> (Миртовые)	Нет данных
<i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn. (лотос орехоносный)	<i>Nelumbonaceae</i> (Лotosовые)	<i>Nelumbo nucifera</i> Gaertn. (лотос орехоносный)
<i>Nepenthes gracilis</i> Korth. (непентес тонкий)	<i>Nepenthaceae</i> (Непентовые)	Нет данных
<i>Nymphaea candida</i> J.Presl et C.Presl (кувшинка снежно-белая)	<i>Nymphaeaceae</i> (Кувшинковые)	Нет данных
<i>Chionanthus retusus</i> Lindl. & Paxton (снежноцвет притупленный), <i>Olea europaea</i> L. (олива европейская)	<i>Oleaceae</i> (Маслиновые)	Нет данных
Нет данных	<i>Pinaceae</i> (Сосновые)	<i>Pinus densiflora</i> Siebold et Zucc. (сосна густоцветковая), <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco (псевдотсуга мензиса)
<i>Phyllanthus acidus</i> (L.) Skeels (филлантус кислый)	<i>Phyllanthaceae</i> (Филлантовые)	Нет данных
Нет данных	<i>Phytolaccaceae</i> (Лаконосовые)	<i>Phytolacca americana</i> L. (лаконос американский)
<i>Pogonatherum crinitum</i> (Thunb.) Kunth (погонатерум косматый)	<i>Poaceae</i> (Злаки)	Нет данных
<i>Persicaria tinctoria</i> (Aiton) Spach (горец красильный)	<i>Polygonaceae</i> (Гречишные)	<i>Rumex japonicus</i> Houtt. (щавель японский)
Нет данных	<i>Ranunculaceae</i> (Лютиковые)	<i>Aconitum variegatum</i> L. (борец пестрый)
<i>Berchemia floribunda</i> Wall. ex Brongn. (крупнолистный метельчатый гибискус)	<i>Rhamnaceae</i> (Крушиновые)	Нет данных
<i>Prunus davidiana</i> (Carrière) Franch. (персик Давида), <i>Prunus spinosa</i> L. (слива колючая), <i>Prunus tomentosa</i> Thunb. (вишня войлочная), <i>Rosa</i> spp. (роза), <i>Rosa damascena</i> Mill. (роза дамасская), <i>Rosmarinus officinalis</i> L. (розмарин лекарственный), <i>Rubus idaeus</i> L. (малина обыкновенная)	<i>Rosaceae</i> (Розовые)	<i>Agrimonia pilosa</i> Ledeb. (репешок волосистый), <i>Prunus padus</i> L. (черемуха обыкновенная), <i>Prunus serotina</i> Ehrh. (черемуха поздняя), <i>Prunus serrulata</i> Lindl. (вишня мелкопиль- чатая), <i>Pyrus communis</i> L. (груша обыкновенная), <i>Rosa agrestis</i> Savi (шиповник полевой), <i>Rosa damascena</i> Mill. (роза дамасская), <i>Rosa soulieana</i> Crep. (роза Сулье), <i>Sorbus aria</i> (L.) Crantz (рябина круглолистная)
<i>Morinda citrifolia</i> L. (моринда цитрусолистная)	<i>Rubiaceae</i> (Мареновые)	Нет данных
Нет данных	<i>Rutaceae</i> (Рутовые)	<i>Phellodendron amurense</i> Rupr. (бархат амурский)
<i>Populus davidiana</i> Dode (тополь дрожащий)	<i>Salicaceae</i> (Ивовые)	<i>Salix raddeana</i> Lacksch. ex Nasarow (ива Радде)
<i>Thesium chinense</i> Turcz. (ленец китайский)	<i>Santalaceae</i> (Санталовые)	<i>Thesium chinense</i> Turcz. (ленец китайский)
Нет данных	<i>Sapindaceae</i> (Сапидовые)	<i>Acer truncatum</i> Bunge (клен усеченный) <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm (кельрейтерия метельчатая)
Нет данных	<i>Saxifragaceae</i> (Камнеломковые)	<i>Mukdenia rossii</i> (Oliv.) Koidz (мукденция Росси)

Окончание табл. 1

Источник кемпферола	Семейство	Источник астрагалина
<i>Solanum lycopersicum</i> L. (томат), <i>Solanum nigrum</i> L. (паслен черный)	<i>Solanaceae</i> (Пасленовые)	Нет данных
<i>Taxus baccata</i> L. (тис ягодный)	<i>Taxaceae</i> (Тисовые)	Нет данных
Нет данных	<i>Theaceae</i> (Чайные)	<i>Camellia sinensis</i> (L.) Kuntze (чай)
Нет данных	<i>Urticaceae</i> (Крапивные)	<i>Urtica cannabina</i> L. (крапива коноплевая)
<i>Vahlia capensis</i> Thunb. (валия капская)	<i>Vahliaceae</i> (Валиевые)	<i>Vahlia capensis</i> Thunb. (валия капская)
<i>Sambucus nigra</i> L. (бузина черная)	<i>Viburnaceae</i> (Калиновые)	Нет данных
<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (Siebold & Zucc.) Planch. (девичий виноград триостренный), <i>Vitis vinifera</i> L. (виноград культурный)	<i>Vitaceae</i> (Виноградовые)	<i>Vitis vinifera</i> L. (виноград культурный)

Примечание. Таблица составлена на основании [5, 7–13].

Кемпферол и астрагалин были обнаружены в 68 различных семействах растений. По количеству видов, содержащих данные соединения, лидируют семейства *Rosaceae* (14), *Asteraceae* (13), *Fabaceae* (13), *Amoryllidaceae* (7), *Apiaceae* (7), *Malvaceae* (7), *Brassicaceae* (7), *Apocynaceae* (5) и *Lamiaceae* (5).

Из представленных в табл. 1 видов, содержащих кемпферол и астрагалин, в коллекции лаборатории биоразнообразия растительных ресурсов Центрального ботанического сада НАН Беларуси (ЦБС) культивируется 22 вида растений, принадлежащих к 12 различным семействам (*Asteraceae* – 5 видов, *Fabaceae* – 4 вида, *Apiaceae*, *Apocynaceae* и *Brassicaceae* – по 2 вида, *Boraginaceae*, *Equisetaceae*, *Crassulaceae*, *Geraniaceae*, *Hypericaceae*, *Phytolaccaceae* и *Viburnaceae* – по 1 виду).

Целью данной работы был скрининг растений из коллекции ЦБС по содержанию кемпферола и его гликозидов.

Объектами исследования являлись растения урожая 2024 г.: галега лекарственная (*Galega officinalis* L.), солодка голая (*Glycyrrhiza glabra* L.), солодка уральская (*Glycyrrhiza uralensis* Fisch. ex DC.), ваточник мясокрасный (*Asclepias incarnata* L.), ваточник сирийский (*Asclepias syriaca* L.), фенхель обыкновенный (*Foeniculum vulgare* Mill.), бурачник лекарственный (*Borago officinalis* L.), гринделия мощная (*Grindelia robusta* Nutt.), свербига восточная (*Bunias orientalis* L.), хвощ полевой (*Equisetum arvense* L.) и герань луговая (*Geranium pratense* L.).

Экстракцию биологически активных веществ (из листьев) проводили 70%-м этиловым спиртом в течение 30 мин при температуре 65 °С, соотношение сырья : экстрагент составляло 1 : 50. После завершения экстракции образцы пропускали через бумажные фильтры. Отфильтрованные экстракты упаривали на роторном испарителе до постоянной массы.

Экстракты исследуемых растений анализировали при помощи хромато-масс-спектрометра (Waters, США) с использованием колонки Symmetry C₁₈ 250 × 4,6 мм, 5мкм (Waters, США). Регистрацию хроматографического разделения осуществляли с помощью диодно-матричного детектора в диапазоне длин волн 200–700 нм и масс-детектора с электроспрей-ионизацией (ESI). Регистрацию масс-спектров осуществляли в области отрицательных (ES⁻) и положительных (ES⁺) ионов при следующих параметрах: напряжение на капилляре – 3 кВ, напряжение на конусе – 40 В для (ES⁻) и 30 В для (ES⁺), напряжение на экстракторе – 3 В для (ES⁻) и 4 В для (ES⁺), температура десольватации – 400 °С, температура источника – 130 °С, общий расход инертного газа (азот) – 400 л/час.

В качестве элюента использовали смесь ацетонитрила (А) и воды с 1%-м содержанием муравьиной кислоты (Б). Объем вводимой пробы – 20 мкл. Скорость элюирования составляла 1 мл/мин.

Обработку результатов осуществляли при помощи программного обеспечения Mass Lynx.

Результаты и их обсуждение. На первом этапе исследований подбирали условия хроматографирования (режим элюирования, состав подвижной фазы), позволяющие проводить одновременную идентификацию кемпферола и астрагалина в растительных экстрактах (табл. 2).

Таблица 2. Режим элюирования и состав подвижной фазы

Table 2. Elution mode and composition of the mobile phase

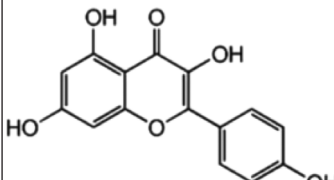
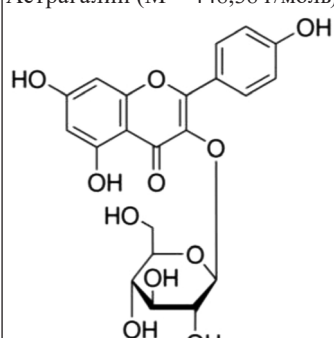
Режим	Режим элюирования и состав подвижной фазы
I – изократический	0–60 мин: 20 % А – 80 % Б
II – градиентный	0–10 мин: 30 % А – 70 % Б 10–40 мин: 50 % А – 50 % Б 40–60 мин: 70 % А – 30 % Б
III – градиентный	0–30 мин: 20 % А – 80 % Б 30–60 мин: 50 % А – 50 % Б
IV – градиентный	перед началом анализа колонка уравнивается в течение 15 мин: 20 % А – 80 % Б 0–12 мин: 30 % А – 70 % Б 12–60 мин: 50 % А – 50 % Б

При проведении анализа в изократическом режиме элюирования (I) удавалось за время анализа идентифицировать только гликозиды кемпферола. Хроматографирование при градиентных режимах (II–IV) позволяло проводить одновременное определение кемпферола и астрагалина, однако удовлетворительного разрешения между соответствующими им пиками и временами удерживания удалось достичь при режиме IV.

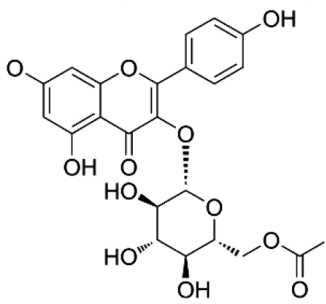
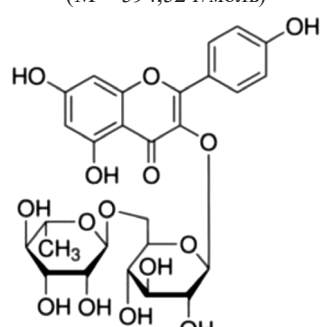
Анализ содержания кемпферола и астрагалина в экстрактах осуществляли на основании времен удерживания, спектроскопического и масс-спектрометрического анализов растворов их стандартных веществ (CAS № 520-18-3, CALBIOCHEM, Германия и CAS № 480-10-4, Sigma, Франция). Идентификацию остальных соединений проводили на основании масс- и электронных спектров, а также сравнением с литературными данными (табл. 3).

Таблица 3. Соединения, идентифицированные в экстрактах исследуемых растений

Table 3. Compounds identified in the extracts of the studied plants

№ п/п	Соединение	Время удерживания, мин	(ESI) ⁻ m/z	(ESI) ⁺ m/z	Максимум поглощения, нм
1	Кемпферол (M = 286,23 г/моль) 	23,02*	285,67 [M-H] ⁻	287,60 [M+H] ⁺	265; 365
2	Астрагалин (M = 448,38 г/моль) 	10,89	285,74 [M-глюкозид-H] ⁻ (агликон – кемпферол) 447,68 [M-H] ⁻	287,67 [M-глюкозид+H] ⁺ (агликон – кемпферол)	264; 345

Окончание табл. 2

№ п/п	Соединение	Время удерживания, мин	(ESI) ⁻ m/z	(ESI) ⁺ m/z	Максимум поглощения, нм
3	Кемпферол-3-О-ацетил- глюкозид (M = 490,41 г/моль) 	12,10	285,67 [M-глюкозид-Н] ⁻ (агликон – кемпферол) 429,80 [M-(C ₂ H ₄ O ₂)-Н] ⁻ , 489,70 [M-Н] ⁻	287,67 [M-глюкозид+Н] ⁺ (агликон – кемпферол)	265; 347
4	Кемпферол-3-О-рутинозид (M = 594,52 г/моль) 	9,90	285,67 [M-глюкозид-Н] ⁻ (агликон – кемпферол) 593,81 [M-Н] ⁻	287,67 [M-глюкозид+Н] ⁺ (агликон – кемпферол)	264; 345

Условные обозначения: * – в растворе стандартного вещества.

Анализируя электронные и масс-спектры и сравнивая их с литературными данными, предположили, что соединение 3 является кемпферол-3-О-ацетилглюкозидом. В масс-спектре в области положительных ионов наблюдается молекулярный ион с m/z 287,60, соответствующий [M-глюкозид+H]⁺ (агликон кемпферол-3-О-ацетилглюкозида – кемпферол), а в масс-спектре в области отрицательных ионов – молекулярные ионы с m/z 285,67, соответствующие [M-глюкозид-Н]⁻ (агликон), с m/z 429,80 и 489,70 – [M-(C₂H₄O₂)-Н]⁻ и [M-Н]⁻ соответственно [14].

Аналогичным образом допустили, что соединение 4 является кемпферол-3-О-рутинозидом [15]. В масс-спектре в области положительных ионов наблюдается молекулярный ион с m/z 287,67, соответствующий [M-глюкозид+H]⁺ (агликон кемпферол-3-О-рутинозида – кемпферол), а в области отрицательных ионов – молекулярные ионы с m/z 285,67, соответствующие [M-глюкозид-Н]⁻ (агликон), и с m/z 593,81 – [M-Н]⁻ [16].

Максимумы поглощения соединений 3 и 4 находятся при 265 (264) нм и 347 (345) нм, что соответствует флавонолам [17].

Ни в одном из исследуемых экстрактов кемпферол не был обнаружен.

Соединения 2–4 удалось идентифицировать в пяти из 11 исследованных видах сырья. Количественное содержание астрагалина в экстрактах проводили на основании калибровочного графика, построенного по стандартным растворам его коммерческого препарата с концентрациями 0,05, 0,1, 0,25 и 0,5 мг/мл (табл. 4).

Таким образом, экстракты *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. ex DC. и *Glycyrrhiza glabra* L. содержат три гликозида кемпферола, экстракты *Borago officinalis* L. – два и экстракты *Geranium pratense* L. и *Asclepias incarnata* L. содержат только астрагалин. Наибольшее содержание астрагалина наблюдается в экстракте, полученном из *Asclepias incarnata* L., наименьшее – *Borago officinalis* L. Следует отметить, что солодка уральская является потенциальным источником гликозидов кемпферола и может быть использована в дальнейших исследованиях, направленных на выделение обогащенной фракции данных соединений и изучение фармакологической активности.

Т а б л и ц а 4. Гликозиды кемпферола, обнаруженные в проанализированных экстрактах

Table 4. Kaempferol glycosides found in the analyzed extracts

Растительное сырье	Содержание астрагалина, мг/г а. с. с.	Кемпферол-3-О-ацетилглюкозид*	Кемпферол-3-О-рутинозид*
Солодка уральская (<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch. ex DC.)	2,21 ± 0,06	+	+
Солодка голая (<i>Glycyrrhiza glabra</i> L.)	1,88 ± 0,03	+	+
Герань луговая (<i>Geranium pratense</i> L.)	2,26 ± 0,06	–	–
Ваточник мясокрасный (<i>Asclepias incarnata</i> L.)	2,51 ± 0,06	–	–
Бурачник лекарственный (<i>Borago officinalis</i> L.)	0,92 ± 0,03	+	–

Условные обозначения: * – количественное определение не проводили в виду отсутствия стандартного вещества; + – обнаружен; – – не обнаружен.

Заключение. Проведенные исследования позволили оптимизировать условия хроматографического разделения и масс-детекции кемпферола и его гликозидов в многокомпонентных растительных экстрактах. Наиболее эффективного разделения биологически активных веществ удалось добиться в градиентном режиме элюирования (режим IV, см. табл. 2). Подобранные режимы ионизации позволили получить четкие масс-спектры молекул кемпферола, а также фрагментов его гликозидов. На основании проведенных исследований удалось идентифицировать гликозиды кемпферола в экстрактах солодки уральской, солодки голой, ваточника мясокрасного, герани луговой и бурачника лекарственного.

Список использованных источников

1. Astragalin: A bioactive phytochemical with potential therapeutic activities / A. Riaz, A. Rasul, G. Hussain [et al.] // *Advances in Pharmacological and Pharmaceutical Sciences*. – 2018. – Vol. 108. – P. 105769. <https://doi.org/10.1155/2018/9794625>
2. Recent progress regarding kaempferol for the treatment of various diseases (Review) / J. Ren, Y. Lu, Y. Qian [et al.] // *Experimental and Therapeutic Medicine*. – 2019. – Vol. 18. – P. 2759–2776. <https://doi.org/10.3892/etm.2019.7886>
3. Therapeutic importance of kaempferol in the treatment of cancer through the modulation of cell signalling pathways / M. Y. Qattan, M. I. Khan, S. H. Alharbi [et al.] // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, № 24. – P. 8864. <https://doi.org/10.3390/molecules27248864>
4. The anticancer potential of kaempferol: a systematic review based on *in vitro* studies / E. F. de Moraes, L. Q. R. de Oliveira, H. G. Farias Moraes [et al.] // *Cancers (Basel)*. – 2024. – Vol. 16, № 3. – P. 585. <https://doi.org/10.3390/cancers16030585>
5. Astragalin: a food-origin flavonoid with therapeutic effect for multiple diseases / J. Chen, K. Zhong, S. Qin [et al.] // *Frontiers in Pharmacology*. – 2023. – Vol. 14. – P. 1265960. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1265960>
6. The flavonoid astragalin shows anti-tumor activity and inhibits PI3K/AKT signaling in gastric cancer / Z. Wang, J. Lv, X. Li, Q. Lin // *Chemical Biology & Drug Design*. – 2021. – Vol. 98, № 5. – P. 779–786. <https://doi.org/10.1111/cbdd.13933>
7. Kaempferol: antimicrobial properties, sources, clinical, and traditional applications / A. Periferakis, K. Periferakis, I. A. Badarau [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2022. – Vol. 23, № 23. – P. 15054. <https://doi.org/10.3390/ijms232315054>
8. Kaempferol: review on natural sources and bioavailability / M. J. Hossen, M. B. Uddin, S. S. U. Ahmed [et al.] // *Kaempferol: Biosynthesis, Food Sources and Therapeutic Uses* / eds: T. Garde-Cerdán, A. Gonzalo-Diago. – New York, NY, USA : Nova Science Publishers, 2016. – P. 101–150.
9. A review on the dietary flavonoid kaempferol / J. M. Calderón-Montaño, E. Burgos-Morón, C. Pérez-Guerrero, M. A. López-Lázaro // *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*. – 2011. – Vol. 11. – P. 298–344.
10. Astragalin inhibits nuclear factor-κB signaling in human colonic epithelial cells and attenuates experimental colitis in mice / Y. M. Han, J. Koh, J. H. Kim [et al.] // *Gut and Liver*. – 2021. – Vol. 15, № 1. – P. 100–108. <https://doi.org/10.5009/gnl19268>
11. Temporospatial flavonoids metabolism variation in *Ginkgo biloba* leaves / Y. Guo, T. Wang, F. F. Fu [et al.] // *Frontiers in Genetics*. – 2020. – Vol. 11. – P. 589326. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.589326>
12. Mehdi, A. Isolation of astragalin from Iraqi *Chenopodium album* / A. Mehdi, M. K. Al-ani Widad, A. Rauf // *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*. – 2018. – Vol. 11, № 12. – P. 530–535. <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2018.v11i12.27958>
13. Выделение флавоноидов из цветков бессмертника песчаного / Н. Ю. Адамцевич, Е. В. Феськова, В. С. Болтовский [и др.] // *Вестник Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта*. – 2021. – № 4. – С. 23–30.
14. Predicted LC-MS/MS Spectrum – 20V, Negative (HMDB0301694) // The human metabolome database (HMDB). – URL: https://hmdb.ca/spectra/ms_ms/177781 (accessed: 04.04.2025).

15. [Glycosides of phenolic acid and flavonoids from the leaves of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch] / S. S. Jia, C. M. Ma, Y. H. Li [et al.] // Yao Xue Xue Bao = Acta pharmaceutica Sinica. – 1992. – Vol. 27, № 6. – P. 441–444.
16. Predicted LC-MS/MS Spectrum – 20V, Negative (HMDB0302426) // The human metabolome database (HMDB). – URL: https://hmdb.ca/spectra/ms_ms/170734 (accessed: 04.04.2025).
17. Фитохимический анализ растительного сырья, содержащего флавоноиды / Г. М. Федосеева, В. М. Минович, Е. Г. Горячкина, М. В. Переломова. – Иркутск : ИГМУ, 2009. – 67 с.

References

- Riaz A., Rasul A., Hussain G., Zahoor M. K., Jabeen F., Subhani Z., Younis T., Ali M., Sarfraz I., Selamoglu Z. Astragalín: a bioactive phytochemical with potential therapeutic activities. *Advances in Pharmacological and Pharmaceutical Sciences*, 2018, vol. 108, p. 105769. <https://doi.org/10.1155/2018/9794625>
- Ren J., Lu Y., Qian Y., Chen B., Wu T., Ji G. Recent progress regarding kaempferol for the treatment of various diseases (Review). *Experimental and Therapeutic Medicine*, 2019, vol. 18, pp. 2759–2776. <https://doi.org/10.3892/etm.2019.7886>
- Qattan M. Y., Khan M. I., Alharbi S. H., Verma A. K., Al-Saeed F. A., Abdullah A. M., Al Areefy A. A. Therapeutic importance of kaempferol in the treatment of cancer through the modulation of cell signalling pathways. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 24, p. 8864. <https://doi.org/10.3390/molecules27248864>
- De Moraes E. F., de Oliveira L. Q. R., Farias Moraes H. G., Souto Medeiros M. R., Freitas R. A., Rodini C. O., Coletta R. D. The anticancer potential of kaempferol: a systematic review based on *in vitro* studies. *Cancers (Basel)*, 2024, vol. 16, no. 3, p. 585. <https://doi.org/10.3390/cancers16030585>.
- Chen J., Zhong K., Qin S., Jing Y., Liu S., Li D., Peng C. Astragalín: a food-origin flavonoid with therapeutic effect for multiple diseases. *Frontiers in Pharmacology*, 2023, vol. 14, p. 1265960. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1265960>
- Wang Z., Lv J., Li X., Lin Q. The flavonoid astragalín shows anti-tumor activity and inhibits PI3K/AKT signaling in gastric cancer. *Chemical Biology & Drug Design*, 2021, vol. 98, no. 5, pp. 779–786. <https://doi.org/10.1111/cbdd.13933>
- Periferakis A., Periferakis K., Badarau I. A., Petran E. M., Popa D. C., Caruntu A., Costache R. S., Scheau C., Caruntu C., Costache D. O. Kaempferol: antimicrobial properties, sources, clinical, and traditional applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, vol. 23, no. 23, p. 15054. <https://doi.org/10.3390/ijms232315054>
- Hossen M. J., Uddin M. B., Ahmed S. S. U., Yu Z. L., Cho J. Y. Kaempferol: review on natural sources and bioavailability. *Biosynthesis, Food Sources and Therapeutic Uses*. Nova Science Publishers, New York, NY, USA, 2016, pp. 101–150.
- Calderón-Montaño J. M., Burgos-Morón E., Pérez-Guerrero C., López-Lázaro M. A review on the dietary flavonoid kaempferol. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 2011, vol. 11, pp. 298–344.
- Han Y. M., Koh J., Kim J. H., Lee J., Im J. P., Kim J. S. Astragalín inhibits nuclear factor- κ B signaling in human colonic epithelial cells and attenuates experimental colitis in mice. *Gut and Liver*, 2021, vol. 15, no. 1, pp. 100–108. <https://doi.org/10.5009/gnl19268>
- Guo Y., Wang T., Fu F. F., El-Kassaby Y. A., Wang G. Temporospatial flavonoids metabolism variation in *Ginkgo biloba* leaves. *Frontiers in Genetics*, 2020, vol. 11, p. 589326. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.589326>
- Mehdi A., Al-ani Widad M. K., Raouf A. Isolation of astragalín from Iraqi *Chenopodium album*. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 2018, vol. 11, no. 12, pp. 530–535.
- Adamtsevich N. Yu., Feskova A. V., Boltovskiy V. S., Titok V. V., Leontiev V. N. Isolation of flavonoids from *Helichrysum arenarium* flowers. *Vesnik Vitebskogo dzyarzhaynaga yuniversiteta = Vesnik of Vitebsk State University*, 2021, no. 4, pp. 23–30 (in Russian).
- Predicted LC-MS/MS Spectrum – 20V, Negative (HMDB0301694). *The human metabolome database (HMDB)*. Available at: https://hmdb.ca/spectra/ms_ms/177781 (accessed 04 april 2025).
- Jia S. S., Ma C. M., Li Y. H., Hao J. H. [Glycosides of phenolic acid and flavonoids from the leaves of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch]. *Yao xue xue bao = Acta pharmaceutica Sinica*, 1992, vol. 27, no. 6, pp. 441–444 (in Chinese).
- Predicted LC-MS/MS Spectrum – 20V, Negative (HMDB0302426). *The human metabolome database (HMDB)*. Available at: https://hmdb.ca/spectra/ms_ms/170734 (accessed 04 april 2025).
- Fedosееva G. M., Mirovich V. M., Goryachkina E. G., Perelomova M. V. *Phytochemical analysis of plant materials containing flavonoids*. Irkutsk, Irkutsk State Medical University, 2009. 67 p. (in Russian).

Информация об авторах

Феськова Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lena.feskova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4798-6925>

Сычик Карина Александровна – студент. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: karinasy4ik.com@gmail.com.

Information about the authors

Feskova Alena U. – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lena.feskova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4798-6925>

Sychyk Karina S. – Student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karinasy4ik.com@gmail.com

Ignatovets Olga S. – Ph. D. (Biology), Associate Professor, Associate Professor of the Department. Belarusian State

Игнатовец Ольга Степановна – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ignatovets@belstu.by; <https://orcid.org/0009-0009-1376-1777>

Леонтьев Виктор Николаевич – кандидат химических наук, доцент, заведующий кафедрой. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leontiev@belstu.by; <https://orcid.org/0000-0001-5348-4350>

Титок Владимир Владимирович – член-корреспондент, доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: V.Titok@cbg.org.by; <https://orcid.org/0009-0001-7484-3460>

Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ignatovets@belstu.by; <https://orcid.org/0009-0009-1376-1777>

Leontiev Viktor N. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leontiev@belstu.by; <https://orcid.org/0000-0001-5348-4350>

Titok Vladimir V. – Corresponding Member, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Chief Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Titok@cbg.org.by; <https://orcid.org/0009-0001-7484-3460>