

ISSN 1029-8940 (Print)

ISSN 2524-230X (Online)

УДК 582.675.1:57.032:547.562.4:543.645.9

<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-2-205-214>

Поступила в редакцию 18.11.2020

Received 18.11.2020

А. М. Деева, Е. А. Войцеховская, Е. В. Спиридович, В. Н. Решетников

Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

СОДЕРЖАНИЕ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЛИСТЬЯХ ПИОНА ДРЕВОВИДНОГО (*PAEONIA SUFFRUTICOSA* ANDR.) И ИХ АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ

Аннотация. Древовидный пион, который считается традиционным декоративным растением в Китае, Японии, Америке и странах Европы, широко используется и как лекарственное растение. Коллекция древовидных пионов в ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» представлена четырьмя таксонами. Целью нашей работы было оценить суммарное содержание фенольных соединений (ФС) и гидроксикоричных кислот (ГК) в листьях рода *Paeonia*, а также антиоксидантный статус данных образцов в зависимости от фазы онтогенеза.

В результате проведенных исследований установлено высокое содержание ФС и ГК в листьях исследованных таксонов рода *Paeonia*, в том числе превышавшее порог в 65 мг/г сырого веса в листьях *Paeonia suffruticosa* во всех наблюдаемых фазах онтогенеза. В изученных сортах доля ГК в составе ФС составляла от 25 до 50 %. Максимальной антиоксидантной активностью обладали экстракты листьев рода *Paeonia*, собранных в период цветения. Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что надземную часть рода *Paeonia* можно рассматривать в качестве перспективного сырья для создания фитопрепаратов, обладающих антиоксидантным действием.

Ключевые слова: *Paeonia suffruticosa*, *Paeonia potanina*, *Paeonia ludlowii*, фенольные соединения, гидроксикоричные кислоты, антиоксидантная активность, фазы онтогенеза, корреляция

Для цитирования: Содержание фенольных соединений в листьях пиона древовидного (*Paeonia suffruticosa* Andr.) и их антиоксидантная активность / А. М. Деева [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 205–214. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-2-205-214>

Alla M. Deeva, Alena A. Voizechovskaia, Alena V. Spiridovich, Vladimir N. Reshetnikov

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

THE CONTENT OF PHENOLIC COMPOUNDS IN THE LEAVES OF *PAEONIA SUFFRUTICOSA* ANDR. AND THEIR ANTIOXIDANT ACTIVITY

Abstract. The tree peony, which is considered a traditional ornamental plant in China, Japan, America and Europe, is also widely used as a medicinal plant. The collection of tree peonies in the State Scientific Institution “Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus” is represented by four taxa. The aim of our work was to assess the quantitative composition of the sum of phenolic compounds and hydroxycinnamic acids in the leaves of the genus *Paeonia*, as well as to assess the antioxidant status of these samples depending on the phase of ontogenesis. As a result of the studies, a high content of phenolic compounds and hydroxycinnamic acids in the leaves of the studied taxa of the genus *Paeonia* was established, including the content exceeding the threshold of 65 mg/g in the leaves of *Paeonia suffruticosa* in all observed phases of ontogenesis. In the studied varieties, the proportion of hydroxycinnamic acids in the composition of phenolic compounds ranged from 25 to 50 %. Extracts of leaves of the *Paeonia* genus collected during the flowering period had the maximum antioxidant activity. Thus, the above data indicate that the aerial part of the *Paeonia* genus can be considered as a promising raw material for the creation of herbal remedies with antioxidant action.

Keywords: *Paeonia suffruticosa*, *Paeonia potanina*, *Paeonia ludlowii*, phenolic compounds, hydroxycinnamic acids, antioxidant activity, phases of ontogenesis, correlation

For citation: Deeva A. M., Voizechovskaia A. A., Spiridovich A. V., Reshetnikov V. N. The content of phenolic compounds in the leaves of *Paeonia suffruticosa* Andr. and their antioxidant activity. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya biyalagichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 205–214 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-2-205-214>

Введение. Род *Paeonia* L., относящийся к семейству *Paeoniaceae*, включает более 50 видов, большинство из которых являются травянистыми многолетними растениями, а незначительная часть – древовидными [1–3].

По данным Ф. Стерна [4], род *Paeonia* относится к монотипному семейству *Paeoniaceae* и насчитывает 33 вида и 14 разновидностей. J. Halda [5] включает в семейство *Paeoniaceae* еще и род

Glaucidium, а в роде *Paeonia* выделяет 25 видов, 33 подвида и 14 разновидностей. Большая часть видов распространена в Европе, Восточной и Юго-Восточной Азии, два вида произрастают в Северной Америке и один – в Северной Африке. Многие виды обитают в горных районах, в лесном и субальпийском поясах. Так называемые древовидные пионы, объединенные в секцию *Moutan*, произрастают только на территории Китая и насчитывают 9 видов, разделенных на две подсекции: *Delavayanae* и *Vaginatae*. Все древовидные пионы произрастают в горах на высоте 1100–3800 м над уровнем моря, в умеренной субтропической климатической зоне [6].

Paeonia suffruticosa – очень популярное декоративное цветущее растение, которое впервые было культивировано более 1600 лет назад в Китае и в настоящее время распространено по всему миру. Этот вид принадлежит к семейству *Paeoniaceae* и был назван «королем цветов» за эффектные и яркие цветки [1]. Среди множества расцветок цветков этого вида большинство укладывается в два кластера: монохромный (красный, розовый, белый, фиолетовый, черный, синий, зеленый и желтый цвета) и двухцветный. Сорты с двухцветным фенотипом встречаются реже и более востребованы, поэтому имеют большую декоративную и коммерческую ценность [7].

Древовидный пион, который считается традиционным декоративным растением в Китае, Японии, Америке и странах Европы, широко используется и как лекарственное растение [8]. Биологически активные соединения были найдены в различных частях пионов древовидных. Так, сухие корни *P. lactiflora* и сухая кора корня *P. suffruticosa* сем. *Paeoniaceae* (традиционные названия *Paeoniae radix* и *Moutan cortex*) долгое время использовались в народной медицине разных стран (Корея, Китай и Япония), в частности в качестве лекарств при сердечно-сосудистых заболеваниях, для улучшения кровообращения и других целей. Было высказано предположение, что оба растения могут содержать общие активные компоненты, которые способствуют ингибированию свертывания крови и агрегации тромбоцитов [9]. Сухая кора корня пиона официально зарегистрирована во всех изданиях Китайской фармакопеи и широко используется в составных препаратах традиционной китайской медицины для улучшения кровообращения и устранения застоя крови [10, 11].

Средняя годовая урожайность семян пиона составляет до 3750 кг/га. Однако в последнее десятилетие этот растительный ресурс все больше привлекает внимание исследователей, поскольку было обнаружено, что семена пиона, особенно его масла, богаты ненасыщенными жирными кислотами, аминокислотами, стильбеноидами и другими веществами [10, 11]. Учеными из Китая [12] было получено масло из семян *P. suffruticosa* Andr., химический анализ которого показал, что в нем особенно высокое содержание α -линоленовой кислоты (>38 %), довольно низкое отношение n-6 к n-3 полиненасыщенных жирных кислот (0,69) и гораздо более высокое содержание γ -токоферола, чем в других растительных маслах. Анализ *in vitro* показал, что у масла семян пиона антирадикальная активность (АРА) более высокая, чем у оливкового масла первого отжима. Умеренное потребление масла из семян *Paeonia* оказывает антиокислительное воздействие как при остром повреждении печени у мышей, вызванном тетрахлометаном, так и при гиперлипидемии у крыс, вызванной диетой [12].

Цветки древовидного пиона богаты питательными белками, микроэлементами и витаминами, и их используют в китайской традиционной кухне со времен династии Сун (960–1279 гг.) [13]. Цветки и корни применяют в народной медицине при заболеваниях, связанных с нарушением менструального цикла, и при дисменорее [14, 15], а экстракты цветков – для производства средств по уходу за кожей (они помогают повысить эластичность кожи и снизить пигментацию). Цветки древовидного пиона, используемые в традиционной медицине и в составе функциональных пищевых продуктов, обладают антимуtagenной, противоопухолевой, сосудопротекторной, противовоспалительной и антиоксидантной функциями [16].

С помощью ВЭЖХ с диодно-матричным детектором и ВЭЖХ-электрораспылительной ионизации-масс-спектрометрии в цветках древовидного пиона были идентифицированы и количественно определены 26 флавоноидов, основными из которых являлись гликозиды кемпферола, лютеолина и апигенина, а также изосалипурпозид. Кроме того, высокую антиоксидантную активность продемонстрировали экстракты лепестков [1]. В течение длительного времени исследования были сосредоточены в основном на пеоноле, пеонифлорине и других биоактивных компонентах венчика, листьев, а также коры корня [1, 17, 18]. Хорошо известно, что лечебные свойства

растений данного вида обусловлены высоким содержанием фенольных соединений (ФС), которые проявляют высокую АРА [19].

В Беларуси древовидные пионы встречаются редко. Их выращивают в ботанических садах, а также цветководы-любители. В озеленительных посадках древовидные пионы используются реже из-за трудностей в получении посадочного материала. В Центральный ботанический сад НАН Беларуси растения видового древовидного пиона были интродуцированы в 1980-е годы [20].

Цель настоящей работы – оценить суммарное содержание фенольных соединений и гидроксикоричных кислот в листьях четырех таксонов рода *Paeonia*, а также антиоксидантный статус данных образцов в зависимости от фазы онтогенеза.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования явились древовидные пионы из коллекции ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси», представленной четырьмя таксонами: *Paeonia suffruticosa*, *Paeonia potaninii*, пионом полукустарниковым сортовым, *Paeonia ludlowii*.

Содержание гидроксикоричных кислот (ГК) определяли спектрофотометрическим методом [21]. Экстракт сбора сухого (0,5 г) растворяли в 100 мл 70 %-ного этилового спирта, раствор фильтровали. Полученный раствор (2 мл) помещали в мерную колбу (25 мл) и доводили до метки 70 %-ным этиловым спиртом. Оптическую плотность данного раствора измеряли на спектрофотометре Agilent 8453 при длине волны 329 нм. Толщина рабочего слоя кюветы – 1 см. Количественное содержание ГК определяли в пересчете на хлорогеновую кислоту.

Суммарное содержание ФС в листьях четырех таксонов рода *Paeonia* определяли модифицированным методом Фолина–Чокальтеу [22]. Для калибровки использовали галловую кислоту в диапазоне концентраций от 0,15 до 1,0 г/л. Результаты выражали в миллиграммах эквивалента галловой кислоты в 1 г сырой массы.

Антиоксидантные свойства исследуемых образцов оценивали в системе с катион-радикалами АБТС⁺. Катион-радикал АБТС⁺ получали при инкубации смеси, содержащей 7 мМ диаммонийной соли 2,2'-азинобис-3-этилбензтиазолин-6-сульфоновой кислоты и 2,45 мМ натрия персульфата в течение 12–16 ч. Реакционная смесь состояла из 2 мл АБТС⁺ и 30–300 мкл исследуемых экстрактов, разведенных в соотношении 1:10 водно-спиртовым экстрагентом. Кинетику изменения оптической плотности измеряли при 734 нм в течение 1 и 6 мин на спектрофотометре Agilent 8453. Контролем служила проба без экстракта [23]. Для сравнительной оценки антиоксидантной активности использовали антиоксидантный параметр, который рассчитывали как тангенс угла наклона прямых зависимостей $D_0 - D$ от количества сухого вещества (в граммах), используемого для реакции, и тролокса (в микромолях), а также параметр антиоксидантной активности (АОА), представляющей собой величину, показывающую количество микромолей эквивалента тролокса на 1 г сырой массы образца.

Статистическую обработку результатов проводили в соответствии с требованиями Государственной фармакопеи XIII ОФС.1.1.0013.15 «Статистическая обработка результатов эксперимента» [24].

Результаты и их обсуждение. Суммарное содержание ФС в листьях изученных таксонов рода *Paeonia* в фазу бутонизации колебалось в пределах от $47,9 \pm 2,0$ мг/г сырого веса в образце *Paeonia ludlowii* до $98,7 \pm 4,1$ мг/г сырого веса в листьях таксона *Paeonia suffruticosa*, а содержание ГК в их составе – в пределах от $17,0 \pm 2,3$ мг/г сырого веса в образце *Paeonia ludlowii* в фазу бутонизации до $31,4 \pm 1,6$ мг/г сырого веса для листьев *Paeonia potaninii* в фазу массового цветения. При этом следует выделить таксон *Paeonia suffruticosa*, в листьях которого во всех фазах онтогенеза суммарное содержание ФС превышало 65 мг/г сырого веса. Также следует отметить, что доля ФС в листьях исследуемых таксонов рода *Paeonia* в фазу массового цветения на 32–52 % выше, чем в фазу бутонизации, и на 50–60 % выше, чем в фазу созревания семян.

Содержание ГК также варьировалось: в зависимости от фазы онтогенеза и в фазу цветения оно было выше на 43–59 %, чем в фазу бутонизации, а в фазу созревания семян – на 26–30 % ниже, чем в фазу массового цветения. Данные показатели значительно меньше (на 2–10 %) варьировались между фазами онтогенеза в листьях *Paeonia ludlowii*, что, возможно, связано с малым

количеством цветков на кусте изучаемого таксона в 2020 г. Доля ГК в составе ФС составляла для исследованных образцов от 25 до 50 % (табл. 1).

Для выявления перспективного таксона как источника высокой АРА было проведено исследование АРА спиртовых экстрактов листового материала, а также оценено влияние фазы онтогенеза растения на общую АРА [25] (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Биологически активные соединения и антиоксидантная активность листьев четырех таксонов рода *Paeonia* в зависимости от фазы онтогенеза

Table 1. Biologically active compounds and antioxidant activity in leaves of four taxa of the genus *Paeonia* depending on the phase of ontogenesis

| Фаза онтогенеза | Таксон | Содержание ГК, мг/г сырого веса | Суммарное содержание ФС, мг/г сырого веса | Соотношение между содержанием ГК и ФС, мг/мг | АОА, мкмоль тролокса/г сырого веса | |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|--|------------------------------------|--------------------|
| | | | | | 1 мин эксперимента | 6 мин эксперимента |
| Бутонизация | <i>Paeonia suffruticosa</i> | 17,9 ± 1,4 | 72,9 ± 2,3 | 0,25 | 27,28 | 29,14 |
| | <i>Paeonia potaninii</i> | 19,7 ± 1,1 | 50,4 ± 2,7 | 0,39 | 20,23 | 24,06 |
| | Пион полукустарниковый сортовой | 18,4 ± 1,7 | 59,8 ± 2,3 | 0,31 | 26,6 | 31,5 |
| | <i>Paeonia ludlowii</i> | 17,0 ± 2,3 | 47,9 ± 2,0 | 0,35 | 19,53 | 21,02 |
| Массовое цветение | <i>Paeonia suffruticosa</i> | 28,3 ± 2,1 | 98,7 ± 4,1 | 0,29 | 37,41 | 42,82 |
| | <i>Paeonia potaninii</i> | 31,4 ± 1,6 | 77,1 ± 3,4 | 0,41 | 30,51 | 35,27 |
| | Пион полукустарниковый сортовой | 26,4 ± 1,1 | 79,3 ± 3,2 | 0,33 | 35,16 | 37,95 |
| | <i>Paeonia ludlowii</i> | 21,7 ± 0,9 | 53,1 ± 2,0 | 0,41 | 24,21 | 27,08 |
| Созревание семян | <i>Paeonia suffruticosa</i> | 22,4 ± 1,2 | 66,2 ± 1,8 | 0,34 | 30,04 | 32,54 |
| | <i>Paeonia potaninii</i> | 24,5 ± 1,5 | 48,3 ± 2,2 | 0,51 | 23,91 | 25,51 |
| | Пион полукустарниковый сортовой | 20,2 ± 1,1 | 50,7 ± 3,2 | 0,40 | 31,08 | 33,98 |
| | <i>Paeonia ludlowii</i> | 19,4 ± 0,8 | 51,9 ± 2,4 | 0,37 | 22,11 | 25,77 |

Согласно результатам, приведенным в табл. 1, АОА, измеренная при помощи АБТС⁺, колебалась в пределах от 19,51 до 37,41 мкмоль тролокса/г сырого веса после 1 мин проведения эксперимента. Наименьшей АОА (менее 25 мкмоль тролокса/г сырого веса) обладали таксоны *Paeonia potaninii* (фазы бутонизации и созревания семян), *Paeonia ludlowii* (фазы бутонизации и созревания семян). АОА для таксонов *Paeonia suffruticosa* (фаза массового цветения) и пиона полукустарникового сортового (фаза массового цветения) превышала значение 35 мкмоль тролокса/г сырого веса уже после 1 мин реакции.

Наши исследования показали, что наиболее высокая АРА отмечается в фазу массового цветения растений рода *Paeonia*. Уровень АОА, измеренной в системе с АБТС⁺ катион-радикалами, в фазу массового цветения был на 25–50 и 10–27 % выше, чем в фазу бутонизации и в фазу созревания семян соответственно. Положительное действие фазы онтогенеза выявлено по отношению как к неферментным компонентам антиоксидантной системы (время реакции системы 1 мин), так и к ферментным (время реакции системы 6 мин) (табл. 1).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что повышение уровня АРА клеток и синтеза в них биологически активных веществ (БАВ) связано с реакцией на стрессовые условия окружающей среды и, как следствие, с индукцией биосинтеза БАВ в листьях в период массового цветения растений рода *Paeonia*.

Сравнение характера кинетических кривых рис. 1 и показателей АОА в течение 1 и 6 мин реакции показало, что соединения, обладающие активностью, реагировали с катион-радикалами в течение первой минуты, обеспечивая 80–93 % вклада в АОА, а затем протекала более медленная стадия, на протяжении которой происходила реакция с катион-радикалами продуктов окисления ФС, образовавшихся на начальной стадии процесса, как это было показано ранее [8], и ферментных компонентов антиоксидантной системы.

На рис. 2, 3 представлена корреляционная связь между величиной АОА после 1 и 6 мин эксперимента и содержанием ГК и ФС (мг/г сырого веса). Более тесная корреляционная связь была

выявлена между уровнем ФС и величиной АРА в листьях таксонов рода *Paeonia*. Коэффициент корреляции между АОА и содержанием ФС составлял 0,84 и 0,86 (соответственно после 1 и 6 мин испытаний) и был выше, чем между показателем АОА и содержанием ГК, – 0,66 и 0,69 (после 1 и 6 мин эксперимента) (табл. 2).

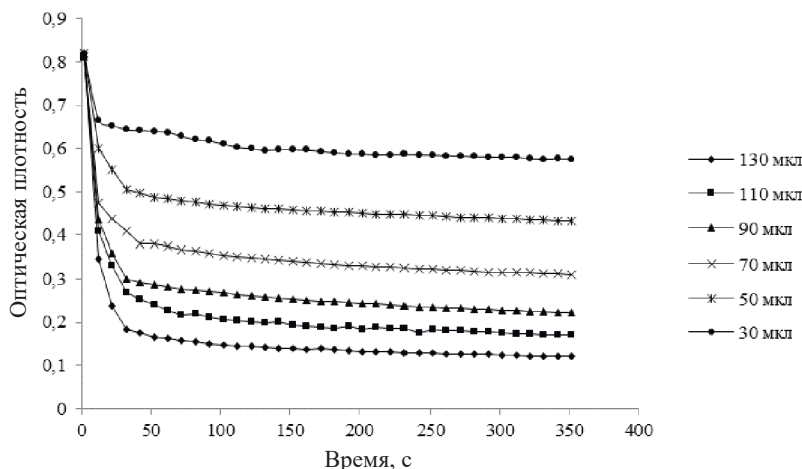


Рис. 1. Кинетические кривые обесцвечивания раствора в модельной системе с катион-радикалами АБТС⁺ в присутствии различных объемов экстракта листьев *Paeonia suffruticosa*

Fig. 1. Kinetic curves of solution decolorization in a model system with radical cations ABTC⁺ in the presence of different volumes of *Paeonia suffruticosa* leaf extract

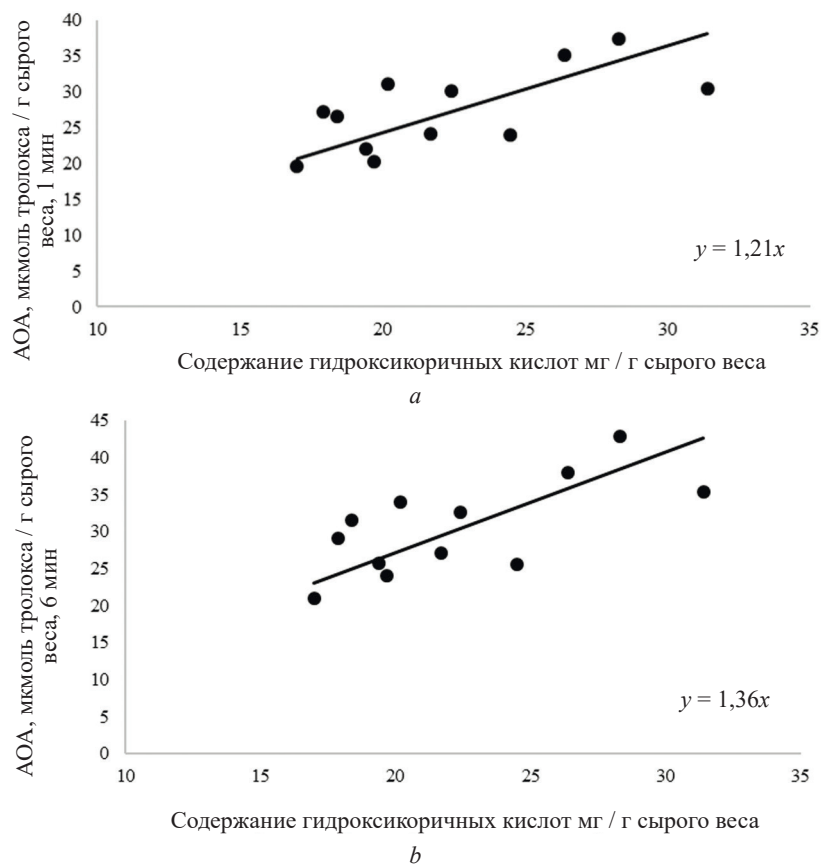


Рис. 2. Корреляционная связь между АОА и содержанием гидроксицинических кислот в четырех таксонах рода *Paeonia* после 1 (а) и 6 (b) мин эксперимента

Fig. 2. Correlation relationship between antioxidant activity and the content of hydroxycinnamic acids in four taxa of the genus *Paeonia* after 1 (a) and 6 (b) minutes of the experiment

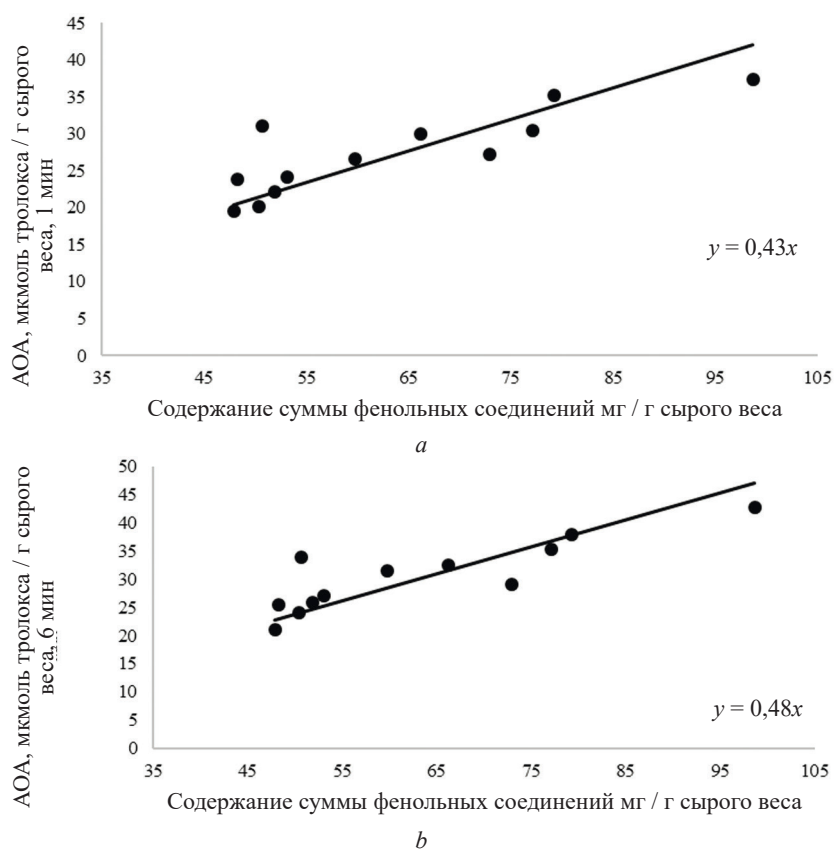


Рис. 3. Корреляционная связь между АОА и содержанием фенольных соединений в четырех таксонах рода *Paeonia* после 1 (а) и 6 (b) мин эксперимента

Fig. 3. Correlation relationship between antioxidant activity and the content of phenolis compounds in four taxa of the genus *Paeonia* after 1 (a) and 6 (b) minutes of the experiment

Все коэффициенты корреляции являлись значимыми на основании того, что расчетные значения критерия Стьюдента во всех корреляционных полях превышали табличные при количестве степеней свободы, равном 10, и уровне значимости $p < 0,05$, т. е. выявлена реальная положительная корреляционная связь между АОА и содержанием ФС и ГК (табл. 2). Причем корреляционная связь между АОА и содержанием ФС являлась наиболее тесной. Из изложенного выше следует, что более высокой АОА обладали таксоны в фазу цветения, что происходило вследствие повышенного синтеза соединений фенольной природы в данную фазу онтогенеза, причем доля ГК достигала 43 %. Таким образом, АОА листьев рода *Paeonia* и фитопрепаратов на их основе может быть достоверно оценена по содержанию фенольных веществ в их составе.

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты корреляции между уровнем АОА, измеренной в системе с катион-радикалами АВТС⁺, и содержанием гидроксикоричных кислот и фенольных соединений в листьях таксонов рода *Paeonia*, произрастающих в ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси»

Table 2. Correlation coefficients between the level of antioxidant activity measured in the system with radical cations АВТС⁺ and the content of hydroxycinnamic acids and phenolic compounds in the leaves of taxa of the *Paeonia* genus growing in the State Scientific Institution “Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus”

| Корреляционные переменные | | Коэф. коррел. | Степени свободы | Уровень значимости | Критерий Стьюдента | |
|---------------------------|-------|---------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------|
| | | | | | расчетный | табличный |
| ГК-АОА | 1 мин | 0,66 | 10 | 0,05 | 2,793 | 2,228 |
| | 6 мин | 0,69 | 10 | 0,05 | 2,978 | 2,228 |
| ФС-АОА | 1 мин | 0,84 | 10 | 0,05 | 4,911 | 2,228 |
| | 6 мин | 0,86 | 10 | 0,05 | 5,330 | 2,228 |

Т а б л и ц а 3. Результаты дисперсионного анализа полученных данных

T a b l e 3. Results of analysis of variance

| Источник вариации | SS | df | MS | F | p | F _{крит} |
|-------------------|----------|----|----------|----------|-----------------------|-------------------|
| Выборка | 1230,506 | 2 | 615,2528 | 10,22373 | 3,0·10 ⁻⁴ | 3,259446306 |
| Столбцы | 12278,87 | 3 | 4092,958 | 68,0132 | 6,7·10 ⁻¹⁵ | 2,866265551 |
| Взаимодействие | 453,2963 | 6 | 75,54939 | 1,255414 | 3,0·10 ⁻⁴ | 2,363750958 |
| Внутри | 2166,44 | 36 | 60,17888 | | | |
| Итого | 16129,11 | 47 | | | | |

Исходя из данных табл. 3, значение F -критерия фактора А – таксон, $F_{\text{набл}} = 10,2$, $F_{\text{крит}}$ лежит в интервале $3,26...+\infty$, а $F_{\text{набл}}$ – в критической области. Следовательно, таксон влияет на содержание БАС фенольной природы и на уровень АРА. Выборочный коэффициент детерминации для фактора А равен 7,5 %, что свидетельствует о низком влиянии данного фактора на исследуемые величины. То же и в отношении фактора В (фаза онтогенеза) – $F_{\text{набл}} = 68,01$, $F_{\text{крит}} = 2,87$. Выборочный коэффициент детерминации для фактора А равен 76,1 %, следовательно, фаза онтогенеза довольно сильно влияет на содержание БАС и уровень АОА. Учитывая значения факторов ($F_{\text{крит}} = 2,36$, $F_{\text{набл}} = 1,25$), отметим: так как $F_{\text{набл}}$ не входит в интервал $2,36...+\infty$, значит, взаимодействия между факторами (таксон, фаза онтогенеза) не наблюдается.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено высокое содержание ФС и ГК в листьях четырех таксонов рода *Paeonia*, в том числе превышавшее порог в 65 мг/г сырого веса в листьях *Paeonia suffruticosa* во всех наблюдаемых фазах онтогенеза. В изученных сортах доля ГК в составе ФС составляла от 25 до 50 %. Установлена высокая АОА листьев четырех таксонов рода *Paeonia* в системе с катион-радикалами АБТС⁺. По результатам дисперсионного анализа выявлено влияние фазы онтогенеза на накопление биологически активных соединений фенольной природы и уровень АРА (выборочный коэффициент детерминации равен 76 %). Максимальной АРА обладали экстракты листьев рода *Paeonia*, собранных в период цветения. Данный факт обусловлен особенностями состава и количественного содержания полифенольного комплекса листьев пионов, который участвует в процессах нейтрализации свободных радикалов и оказывает влияние на различные этапы окислительных процессов с участием активных форм кислорода. Также показано наличие положительной корреляции между АОА, содержанием ФС и ГК, что может быть использовано для оценки биологической активности листьев пионов и фитопрепаратов на их основе. Наиболее тесная корреляционная связь установлена между показателем АОА и содержанием ФС, поэтому именно использование количественной оценки содержания ФС может рассматриваться как наиболее приемлемый показатель для экспрессной оценки АОА растительного сырья. Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что надземную часть рода *Paeonia* можно рассматривать в качестве перспективного сырья для создания фитопрепаратов, обладающих антирадикальным действием.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Природопользование и экология» подпрограммы 2 «Биоразнообразие, биоресурсы, экология», задание 2.37. Авторы статьи выражают благодарность научному сотруднику лаборатории интродукции и селекции орнаментальных растений ГНУ «Центральный ботанический сад НАН Беларуси» В. В. Гайшун за предоставленный растительный материал.

Acknowledgements. The research was funded by State Program of Scientific Research “Nature management and ecology”, subprogram 2 “Biodiversity, biological resources, ecology”, task 2.37. We would like thanks for the plant samples provided to researcher of the Laboratory for the introduction and selection of ornamental plants of Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus V. V. Gayshun.

Список использованных источников

1. Flavonoid composition and antioxidant activity of tree peony (*Paeonia* section Moutan) yellow flowers / C. Li [et al.] // J. Agricult. Food Chem. – 2009. – Vol. 57, N 18. – P. 8496–8503. <https://doi.org/10.1021/jf902103b>
2. Кутровская, М. Н. О влиянии метеорологических факторов на фенологическое развитие древовидных пионов (*Paeonia suffruticosa* Andr.) на Южном берегу Крыма / М. Н. Кутровская, С. П. Корсакова // Бюл. Никитск. бот. сада. – 2006. – Вып. 93. – С. 28–32.

3. Transcriptomic analysis of *Paeonia delavayi* wild population flowers to identify differentially expressed genes involved in purple-red and yellow petal pigmentation / Q. Q. Shi [et al.] // PLoS ONE. – 2015. – Vol. 10, N 8. – P. e0135038. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135038>
4. Stern, F. C. A study of the genus *Paeonia* / F. C. Stern. – Royal Horticultural Society in London, 1946. – 274 p.
5. Halda, J. J. The genus *Paeonia* / J. J. Halda, J. W. Waddick. – Portland : Timber Press, 2004. – 226 p.
6. Виды рода *Paeonia* в условиях урбанизированной среды и перспективы использования их в современном градостроительстве / В. Ю. Мельников, К. Г. Ткаченко // Урбоэко-системы: проблемы и перспективы развития: материалы 5-й междунар. науч.-практ. конф. (Ишим, 25–26 марта 2010 г.) / отв. ред. Н. Н. Никитина. – Ишим, 2010. – С. 97–98.
7. Zhao, D. Q. Recent advances on the development and regulation of flower color in ornamental plants / D. Q. Zhao, J. Tao // Front. Plant Sci. – 2015. – Vol. 6. – Art. 261. – P. 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00261>
8. Phytochemical variation among the traditional Chinese medicine Mu Dan Pi from *Paeonia suffruticosa* (tree peony) / S.-S. Li [et al.] // Phytochemistry. – 2018. – Vol. 146. – P. 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2017.11.008>
9. Platelet anti-aggregatory and blood anti-coagulant effects of compounds isolated from *Paeonia lactiflora* and *Paeonia suffruticosa* / Y. K. Koo [et al.] // Pharmazie. – 2010. – Vol. 65, N 8. – P. 624–628.
10. Determination of chemical variability of phenolic and monoterpene glycosides in the seeds of *Paeonia* species using HPLC and profiling analysis / C. He [et al.] // Food Chem. – 2013. – Vol. 138, N 4. – P. 2108–2114. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.049>
11. Discovery of potent *in vitro*, neuroprotective effect of the seed extracts from seven *Paeonia* L. (peony) taxa and their fatty acid composition / D. Sevim [et al.] // Industrial Crops Products. – 2013. – Vol. 49, N 8. – P. 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.05.001>
12. Chemical profile and antioxidant activity of the oil from peony seeds (*Paeonia suffruticosa* Andr.) / Xin Yang [et al.] // Oxid. Med. Cell. Longevity. – 2017. – Vol. 2017. – Art. ID 1207139. <https://doi.org/10.1155/2017/9164905>
13. Zhou, L. Tree peony flower and diet therapy / L. Zhou // World Cuisine. – 2001. – Vol. 3. – P. 39.
14. Isolation and purification of four flavonoid constituents from the flowers of *Paeonia suffruticosa* by high-speed counter-current chromatography / X. Wang [et al.] // J. Chromatogr. A. – 2005. – Vol. 1075, N 1–2. – P. 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.04.017>
15. Screening of a polar extract of *Paeonia rockii*: composition and antioxidant and antifungal activities / P. Picerno [et al.] // J. Ethnopharmacol. – 2011. – Vol. 138, N 3. – P. 705–712. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.09.056>
16. Antioxidant capacity of extract from edible flowers of *Prunus mume* in China and its active components / J. Shi [et al.] // LWT – Food Sci. Technol. – 2009. – Vol. 42, N 2. – P. 477–482. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.09.008>
17. Molecular mechanism of preventive effect of peony root extract on neuron damage / K. Sunaga [et al.] // J. Herbal Pharmacother. – 2004. – Vol. 4, N 1. – P. 9–20. https://doi.org/10.1080/j157v04n01_02
18. Ameliorative effects of paeoniflorin, a major constituent of peony root, on adenosine A1 receptor-mediated impairment of passive avoidance performance and long-term potentiation in the hippocampus / K. Tabata [et al.] // Biol. Pharm. Bull. – 2001. – Vol. 24, N 5. – P. 496–500. <https://doi.org/10.1248/bpb.24.496>
19. Baytop, T. Türkiye'de bitkiler ile tedavi, geçmişte ve bugün [Therapy with medicinal plants in Turkey (past and present)] / T. Baytop. – 2nd ed. – Istanbul : Nobel Tıp Kitabevleri, 1999. – 480 p.
20. Гайшун, В. В. Пион древовидный (*Paeonia suffruticosa* Andr.) в условиях Беларуси / В. В. Гайшун // Роль ботанических садов и дендрариев в сохранении, изучении и устойчивом использовании разнообразия растительного мира : материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 85-летию Центр. бот. сада Нац. акад. наук Беларуси (г. Минск, 6–8 июня 2017 г.) : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси; Центр. бот. сад ; редкол. : В. В. Титок [и др.]. – Минск : Медисонт, 2017. – Ч. 1. – С. 52–54.
21. Чистова, Ю. И. Количественное определение суммы гидроксикоричных кислот в экстракте сбора одуванчика лекарственного травы и лопуха большого листа сухом / Ю. И. Чистова // Вестн. Смоленск. гос. мед. акад. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 170–176.
22. Analysis of antioxidative phenolic compounds in artichoke (*Cynara scolymus* L.) / M. Wang [et al.] // J. Agric. Food Chem. – 2003. – Vol. 51, N 3. – P. 601–608. <https://doi.org/10.1021/jf020792b>
23. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay / R. Re [et al.] // Free Radic. Biol. Med. – 1999. – Vol. 26, N 9–10. – P. 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(98)00315-3)
24. Государственная фармакопея Российской Федерации. – 13-е изд. – М., 2015. – Т. 1. – 1470 с. – Режим доступа: http://193.232.7.120/feml/clinical_ref/pharmacopoeia_1_html/HTML/#1/z. – Дата доступа: 31.01.2019.
25. Антиоксидантная и антирадикальная активность *in vitro* экстрактов травы *Sanguisorba officinalis* L., собранной в различные фазы развития / Е. М. Мальцева [и др.] // Медицина в Кузбассе. – 2017. – Т. 16, № 22. – С. 32–38.

References

1. Li C., Du H., Wang L., Shu Q., Zheng Y., Xu Y., Zhang J., Zhang J., Yang R., Ge Y. Flavonoid composition and antioxidant activity of tree peony (*Paeonia* section Moutan) yellow flowers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, vol. 57, no. 18, pp. 8496–8503. <https://doi.org/10.1021/jf902103b>
2. Kutrovskaya M. N., Korsakov S. P. On the influence of meteorological factors on the phenological development of tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) on the southern coast of Crimea. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the Nikitsky Botanical Garden], 2006, iss. 93, pp. 28–32 (in Russian).

3. Shi Q. Q., Zhou L., Wang Y., Li K., Zheng B. Q., Miao K. Transcriptomic analysis of *Paeonia delavayi* wild population flowers to identify differentially expressed genes involved in purple-red and yellow petal pigmentation. *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, no. 8, p. e0135038. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135038>
4. Stern F. C. A study of the genus *Paeonia*. – London, 1946. – 274 p.
5. Halda J. J., Waddick J. W. *The genus Paeonia*. Portland, Timber Press Publ., 2004. 226 p.
6. Mel'nikov V. Yu., Tkachenko K. G. Species of the genus *Paeonia* in an urbanized environment and the prospects for their use in modern urban planning. *Urboekosistemy: problemy i perspektivy razvitiya: materialy 5-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Ishim, 25–26 marta 2010 goda)* [Urboecosystems: problems and development prospects: materials of the 5th International scientific and practical conference (Ishim, March 25–26, 2010)]. Ishim, 2010, pp. 97–98 (in Russian).
7. Zhao D. Q., Tao J. Recent advances on the development and regulation of flower color in ornamental plants. *Frontiers in Plant Science*, 2015, vol. 6, p. 261. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00261>
8. Li S.-S., Wu Q., Yin D.-D., Feng C.-Y., Liu Z.-A., Wang L.-S. Phytochemical variation among the traditional Chinese medicine Mu Dan Pi from *Paeonia suffruticosa* (tree peony). *Phytochemistry*, 2018, vol. 146, pp. 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2017.11.008>
9. Koo Y. K., Kim J. M., Koo J. Y., Kang S. S., Bae K. H., Kim Y. S., Chung Jin-Ho, Yun-Choi H. S. Platelet anti-aggregatory and blood anti-coagulant effects of compounds isolated from *Paeonia lactiflora* and *Paeonia suffruticosa*. *Pharmazie*, 2010, vol. 65, no. 8, pp. 624–628.
10. He C., Peng Y., Xiao W., Liu H., Xiao P. G. Determination of chemical variability of phenolic and monoterpene glycosides in the seeds of *Paeonia* species using HPLC and profiling analysis. *Food Chemistry*, 2018, vol. 138, no. 4, pp. 2108–2114. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.049>
11. Sevim D., Senol F. S., Gulpinar A. R., Orhan I. E., Kaya E., Kartal M., Sener B. Discovery of potent *in vitro*, neuroprotective effect of the seed extracts from seven *Paeonia* L. (peony) taxa and their fatty acid composition. *Industrial Crops and Products*, 2013, vol. 49, no. 8, pp. 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.05.001>
12. Xin Yang, Di Zhang, Li-Min Song, Qian Xu, Hong Li, Hui Xu. Chemical profile and antioxidant activity of the oil from peony seeds (*Paeonia suffruticosa* Andr.). *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017, vol. 2017, art. ID 1207139. <https://doi.org/10.1155/2017/9164905>
13. Zhou L. Tree peony flower and diet therapy. *World Cuisine*, 2001, vol. 3, p. 39.
14. Wang X., Cheng C. G., Sun Q. L., Li F. W., Liu J. H., Zheng C. C. Isolation and purification of four flavonoid constituents from the flowers of *Paeonia suffruticosa* by high-speed counter-current chromatography. *Journal of Chromatography A*, 2005, vol. 1075, no. 1–2, pp. 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.04.017>
15. Picerno P., Mencherini T., Sansone F., Gaudio P. D., Granata I., Porta A., Aquino R. P. Screening of a polar extract of *Paeonia rockii*: composition and antioxidant and antifungal activities. *Journal of Ethnopharmacology*, 2011, vol. 138, no. 3, pp. 705–712. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.09.056>
16. Shi J. Y., Gong J. Y., Liu J. E., Wu X. Q., Zhang Y. Antioxidant capacity of extract from edible flowers of *Prunus mume* in China and its active components. *LWT – Food Science and Technology*, 2009, vol. 42, no. 2, pp. 477–482. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.09.008>
17. Sunaga K., Sugaya E., Kajiwara K., Tsuda T., Sugaya A., Kimura M. Molecular mechanism of preventive effect of peony root extract on neuron damage. *Journal of Herbal Pharmacotherapy*, 2004, vol. 4, no. 1, pp. 9–20. https://doi.org/10.1080/j157v04n01_02
18. Tabata K., Matsumoto K., Murakami Y., Watanabe H. Ameliorative effects of paeoniflorin, a major constituent of peony root, on adenosine A1 receptor-mediated impairment of passive avoidance performance and long-term potentiation in the hippocampus. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 2001, vol. 24, no. 5, pp. 496–500. <https://doi.org/10.1248/bpb.24.496>
19. Baytop T. *Türkiyede bitkiler ile tedavi, geçmişte ve bugün [Therapy with medicinal plants in Turkey (past and present)]*. 2nd ed. Istanbul, Nobel Tıp Kitabevleri, 1999. 480 p.
20. Gaishun V. V. Tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) in the conditions of Belarus. *Rol' botanicheskikh sadov i dendrariyev v sokhraneniі, izuchenii i istoichivom ispol'zovanii raznoobraziya rastitel'nogo mira: materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu Tsentral'nogo botanicheskogo sada Natsional'noi akademii nauk Belarusi (Minsk, 6–8 iyunya 2017 goda). Chast' I* [The role of botanical gardens and arboretums in the conservation, study and sustainable use of plant diversity: materials of the International scientific conference dedicated to the 85th anniversary of the Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, June 6–8, 2017). Pt. 1]. Minsk, 2017, pp. 52–54 (in Russian).
21. Chistova Yu. I., Quantitative determination of the sum of hydroxycinnamic acids in the dry extract of dandelion herb and large burdock leaf specie. *Vestnik Smolenskoj gosudarstvennoj meditsinskoi akademii* [Bulletin of the Smolensk State Medical Academy], 2019, vol. 18, no. 1, pp. 170–176 (in Russian).
22. Wang M., Simon J. E., Aviles I. F., He K., Zheng Q., Tadmor Y. Analysis of antioxidative phenolic compounds in artichoke (*Cynara scolymus* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, vol. 51, no. 3, pp. 601–608. <https://doi.org/10.1021/jf020792b>
23. Re R., Pellegrinia N., Proteggentea A., Pannalaa A., Yanga M., Rice-Evansa C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, vol. 26, no. 9–10, pp. 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/s0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/s0891-5849(98)00315-3)
24. *Russian Federation State Pharmacopoeia. 13th ed.* Moscow, 2015, vol. 1, 1470 p. Available at: http://193.232.7.120/feml/clinical_ref/pharmacopoeia_1_html/HTML/#1/z (accessed 31.01.2019) (in Russian).
25. Mal'tseva E. M., Egorova N. O., Egorova I. N., Mukhamadiyarov R. A. Antioxidant and antiradical activity *in vitro* of herb extracts of *Sanguisorba officinalis* L., gathered in various development stages. *Meditsina v Kuzbasse* [Medicine in Kuzbass], 2017, vol. 16, no. 22, pp. 32–38 (in Russian).

Информация об авторах

Деева Алла Михайловна – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: alladzeeva@gmail.com

Войцеховская Елена Анатольевна – науч. сотрудник. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: vazek@list.ru

Спиродович Елена Владимировна – канд. биол. наук, заведующий лабораторией. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.spirydovich@gmail.com

Решетников Владимир Николаевич – академик, доктор биол. наук, профессор, заведующий отделом. Центральный ботанический сад НАН Беларуси (ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: V.Reshetnikov@cbg.org.by

Information about the authors

Alla M. Deeva – Ph. D. (Biol.), Senior Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alladzeeva@gmail.com

Alena A. Voizechovskaia – Researcher. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vazek@list.ru

Alena V. Spiridovich – Ph. D. (Biol.), Head of the Laboratory. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.spirydovich@gmail.com

Vladimir N. Reshetnikov – Academician, D. Sc. (Biol.), Professor, Head of the Department. Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (2v, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Reshetnikov@cbg.org.by