

СКРИНИНГ ИНВАЗИОННЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ НА НАЛИЧИЕ ВЕЩЕСТВ АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2025 Виноградова Ю.К.*, Шелепова О.В.**

Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН, ул. Ботаническая, д. 4, г. Москва, 127276, Россия
e-mail: *gbsad@mail.ru; **shov_gbsad@mail.ru

Поступила в редакцию 18.02.2025. После доработки 14.07.2025. Принята к публикации 18.08.2025

Поиск природных антиоксидантов благодаря их роли в минимизации вредных последствий окислительного стресса для организма человека становится всё более актуальным. Выдвинута гипотеза о повышенном уровне вторичных метаболитов в инвазионных видах, поскольку во вторичном ареале растения произрастают в стрессовых условиях среды. Проведён целенаправленный скрининг наиболее агрессивных инвазионных видов на наличие в них соединений с антиоксидантной активностью. Методом DPPH определена антиоксидантная активность экстрактов листьев (51 образец) и соцветий (56 образцов) 39 инвазионных видов растений, собранных в различных регионах Европы. Показано, что все исследованные инвазионные виды активно ингибируют окислительные процессы и, следовательно, могут формировать антиоксидантную защиту в условиях окислительного стресса. Наиболее выраженной антиоксидантной активностью обладают спиртовые экстракты соцветий у всех видов рода *Solidago* и у *Ailanthus altissima* и спиртовые экстракты листьев видов рода *Solidago*, *Veronica filiformis* и *Sorbaria sorbifolia*. У водных растворов антиоксидантная активность в целом несколько ниже: наиболее высокая антиоксидантная активность соединений зафиксирована в листьях *Reynoutria×bohemica*, *Ribes aureum* и *Sorbaria sorbifolia* и в соцветиях *Reynoutria×bohemica* и *Ailanthus altissima*. Благодаря высокой антиоксидантной активности инвазионные растения являются перспективным ресурсом для использования в медицинской практике.

Ключевые слова: инвазионные виды, окислительный стресс, антиоксидантные соединения, ресурсный потенциал

DOI: 10.35885/1996-1499-18-3-026-037

Введение

В связи с негативным воздействием свободных радикалов на человека во всём мире ведутся исследования по поиску эффективных соединений (антиоксидантов), защищающих живые организмы от их повреждающего воздействия. В живом организме должен существовать баланс между производством и накоплением активных форм кислорода и азота в клетках и тканях, а также способность биологической системы детоксифицировать эти формы. Отсутствие этого баланса вызывает явление, называемое окислительным стрессом [Pizzino и др., 2017]. Поэтому особое внимание привлекают заболевания/расстройства, связанные с окислительным стрессом (нейродегенеративные, сердечно-сосудистые, митохондриальные заболевания и даже рак), так как в их патогенезе принимают участие свободные радикалы [Miguel, 2010; Olszowy, 2019]. Этот факт вызвал растущий интерес

к попыткам понять механизм действия свободных радикалов и найти эффективные вещества (антиоксиданты), которые защищают живые организмы от их повреждающего воздействия [Mishra et al., 2012]. Антиоксиданты, используемые в медицине и промышленности, делятся на две группы: природные и синтетические. Поскольку наиболее распространённые синтетические антиоксиданты подозреваются в том, что они оказывают вредное воздействие на организм человека [Dawidowicz et al., 2015], всё больше внимания уделяется природным антиоксидантным соединениям, обнаруженным в растениях [Chanda, Dave, 2009; Olszowy and Dawidowicz, 2018]. Среди них наиболее популярны полифенольные соединения, которые содержат в своей структуре одну или несколько гидроксильных групп. Эти соединения можно структурно разделить на два основных класса: фенольные кислоты и флавоноиды.

За последние 200 лет региональная флора во многих странах претерпела весьма существенные изменения: едва ли не треть её составляют чужеродные, неаборигенные виды, некоторые из которых (инвазионные) активно внедряются в естественные ценозы. Выявление механизмов, которые помогают крайне вредоносным инвазионным растениям-захватчикам добиваться успеха, имеет важное значение для концептуальных вопросов экологии и управления экосистемами [Mack, 1996; Huang, Asner, 2009]. Ключом к пониманию инвазионного процесса, по-видимому, являются не столько биоморфологические признаки, сколько механизмы, включающие взаимодействие с видами-конкурентами во вторичном ареале [Carruccino, Arnason, 2006]. Гипотеза новейшего оружия (Novel weapons hypothesis) рассматривает успешные вторжения с точки зрения воздействия инвазионных видов на аборигенные определёнными химическими веществами, к которым аборигенные организмы не адаптированы [Callaway, Aschehoug, 2000]. Действительно, инвазионные популяции обычно представляют собой одновидовые «заросли», в которых растут лишь единичные угнетённые растения, поскольку чужеродные инвазионные виды выделяют химические вещества, ингибирующие прорастание всех других растений. И это означает, что инвазионные растения вполне могут обладать специфическими биологически активными веществами и рассматриваться как ресурсные виды.

Инвазионные виды пока не находят широкого практического применения. Тем не менее ресурсный потенциал инвазионных растений как нового источника ценных веществ не вызывает сомнений. Во вторичном ареале они имеют большие, чем на родине, размеры и формируют мощные (обычно одновидовые) заросли. Площадь территории, занятой инвазионными видами, особенно в антропогенно нарушенных местообитаниях, довольно велика, поэтому возможные объёмы их ежегодных заготовок достаточно высоки. Основная проблема использования чужеродных видов – недостаток сведений о динамике накопления ими химических веществ. Имеющиеся в литературе данные по биохимии вида в есте-

ственном ареале не всегда можно приложить к этому же таксону из вторичного ареала в связи со значительными микроэволюционными изменениями растений в новых почвенно-климатических условиях [Виноградова и др., 2019].

В связи с этим весьма актуально и перспективно провести целенаправленный скрининг наиболее агрессивных инвазионных видов на наличие в них ценных фитохимических соединений.

Цель работы – сформировать представление об инвазионных видах как потенциальных ресурсных растениях, определить антиоксидантную активность соединений из различных органов наиболее агрессивных инвазионных видов и выявить образцы растений, обладающих наиболее высокой активностью удаления свободных радикалов (антирадикальной активностью).

Материалы и методы

Образцы инвазионных видов собраны в различных регионах Европы (табл. 1). Растения собирали в фазу начала цветения, исследовали листья и соцветия/цветки отдельно.

Высушенный на воздухе растительный материал механически измельчали в лабораторной мельнице до получения однородного порошка. Навески измельчённого образца (1 г) экстрагировали в 25 мл тремя различными растворителями (дистиллированная вода, этанол и метанол). Экстракция проводилась в течение 12 ч при непрерывном перемешивании на шейкере. После этого экстракты фильтровали для последующего измерения.

Антиоксидантную активность определяли по методике Brand-Williams et al. [1995] с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH) на спектрофотометре (Genesys 20 UV-VIS, USA) в соответствии с методом, подробно описанным в [Vinogradova et al., 2021]. DPPH является стабильным свободным радикалом, который принимает водородный радикал или электрон для того, чтобы стать стабильной диамагнитной молекулой [Mu et al., 2004]. Уменьшение содержания радикала DPPH используется в качестве оценки антиоксидантного действия соединений антиоксидантной природы.

Таблица 1. Характеристика исследуемых образцов

Аббре- виатура	Название вида	Место сбора образцов	Исследуемые органы (л –листья; соцв. – соцветия)
An	<i>Acer negundo</i> L.	Словакия, Нитра. 48.299255 с. ш., 18.099472 в. д.,	Л., соцв. ♀ и ♂
Ada	<i>Adenocaulon adhaerescens</i> Maxim.	Россия, Москва, Главный ботанический сад. 55.842859 с. ш., 37.593085 в. д.,	Л., соцв.
Ail	<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	Словакия, Нитра. 48.302701 с. ш., 18.095007 в. д.,	Л., бутоны и цветки
Amr	<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	Россия, Москва 55.849610 с. ш., 37.590941 в. д.,	Л., соцв.
Asp	<i>Amelanchier ×spicata</i> (Lam.) K.Koch	Россия, Московская обл., окрестности г. Звенигород. 55.779890 с. ш., 36.797929 в. д.,	Л., соцв.
Aar	<i>Aronia arbutifolia</i> (L.) Pers.	Россия, Москва, Главный ботанический сад. 55.842859 с. ш., 37.593085 в. д.,	Л., соцв.
Ame	<i>Aronia melanocarpa</i> (Michx.) Elliott	Россия, Москва, Главный ботанический сад. 55.842859 с. ш., 37.593085 в. д.,	Л., соцв.
Ami	<i>Aronia mitschurinii</i> A.K.Skvortsov & Maitul.	Россия, Московская обл., окрестности г. Звенигород. 55.780144 с. ш., 36.797598 в. д.,	Л., соцв.
Apr	<i>Aronia × prunifolia</i> (Mar- shall) Rehder	Россия, Москва, Главный ботанический сад. 55.842859 с. ш., 37.593085 в. д.,	Л., соцв.
Bid	<i>Bidens ×decipiens</i> Warnst.	Беларусь. Брестская обл. Ганцевичи 52.746344 с. ш., 26. 383355 в. д.,	Л., соцв.
Bud	<i>Buddleja davidii</i> Franch.	Великобритания. Лондон. Риджентс парк. 51.530669 с. ш., 0.161470 з.д.	Л., соцв.
Ech	<i>Echinocystis lobata</i> (Mich.) Torr et Gray	Россия, Московская обл., 55.686290 с. ш., 36.684440 в. д.,	Л., соцв.
Era	<i>Erigeron annuus</i> (L.) Desf	Словакия, Нитра. 48.299255 с. ш., 18.099472 в. д.,	Л., соцв.
Erb	<i>Erigeron bonariensis</i> L.	Италия, Верона. 45.430971 с. ш., 10.980007 в. д.,	Соцв.
Erc1	<i>Erigeron canadensis</i> L.	Великобритания. Лондон. Риджентс парк. 51.530669 с. ш., 0.161470 з.д.	Л., соцв.
Erc2	<i>Erigeron canadensis</i> L.	Великобритания. Ричмонд, Кью 51.477479 с. ш., 0.302858 з.д.	Л., соцв.
Erc3	<i>Erigeron canadensis</i> L.	Италия, Верона. 45.430971 с. ш., 10.980007 в. д.,	Соцв.
Erc4	<i>Erigeron canadensis</i> L.	Словакия, Нитра. 48.299255 с. ш., 18.099472 в. д.,	Соцв.
Ers1	<i>Erigeron sumatrensis</i> Retz.	Италия. Бергамо 45.707618 с. ш., 9.658052 в. д.,	Л., соцв.
Ers2	<i>Erigeron sumatrensis</i> Retz.	Италия, Верона. 45.430971 с. ш., 10.980007 в. д.,	Соцв.
Eut1	<i>Euthamia graminifolia</i> (L.) Nutt.	Беларусь, Брестская обл., Пинский р-н. 52.231771 с. ш., 26.573801 в. д.,	Л., соцв.
Eut2	<i>Euthamia graminifolia</i> (L.) Nutt.	Чехия, Брно. Бот. сад ун-та Масарика. 49.204451 с. ш., 16.596100 в. д.,	Л., соцв.
Gap1	<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.	Беларусь. Окрестности г. Несвиж. 53.292293 с. ш., 26.647112 в. д.,	Л., соцв.
Gap2	<i>Galinsoga parviflora</i> Cav.	Россия, Московская обл., окрестности г. Звенигород. 55.782430 с. ш., 36.796307 в. д.,	Л., соцв.
Gaq1	<i>Galinsoga quadriradiata</i> Ruiz & Pav.	Беларусь. Окрестности г. Несвиж. 53.292293 с. ш., 26.647112 в. д.,	Л., соцв.
Gaq2	<i>Galinsoga quadriradiata</i> Ruiz & Pav.	Россия, Москва, Главный ботанический сад. 55.842859 с. ш., 37.593085 в. д.,	Л., соцв.
Gem	<i>Geum macrophyllum</i> Willd.	Россия, Москва, Главный ботанический сад. 55.842859 с. ш., 37.593085 в. д.,	Л., соцв.
Hel	<i>Helianthus tuberosus</i> L.	Словакия. г. Нова Баня. 48.407742 с. ш., 18.632576 в. д.,	Л., соцв.

Hor	<i>Hordeum jubatum</i> L.	Словакия, г. Нитра. 48.317958 с. ш., 18.140982 в. д.,	Л., соцв.
Img	<i>Impatiens glandulifera</i> Royle	Россия, Московская обл. 55.686290 с. ш., 36.684440 в. д.,	Л., соцв.
Imp	<i>Impatiens parviflora</i> DC.	Россия, Московская обл. 55.686290 с. ш., 36.684440 в. д.,	Л., соцв.
Lun	<i>Lunaria rediviva</i> L.	Россия, Москва, Главный ботанический сад. 55.842859 с. ш., 37.593085 в. д.,	Л., соцв.
Lup	<i>Lupinus polyphyllus</i> Lindl.	Россия, Московская обл., 55.771983 с. ш., 36.805890 в. д.,	Л., соцв.
Oen	<i>Oenothera biennis</i> L.	Россия, Москва, Главный ботанический сад. 55.842859 с. ш., 37.593085 в. д.,	Л., соцв.
Par	<i>Parthenocissus inserta</i> (A.Kern.) Fritsch	Словакия, г. Нитра. 48.303192 с. ш., 18.099341 в. д.,	Л., соцв.
Phy	<i>Phytolacca americana</i> L.	Словакия, г. Нитра. 48.302721 с. ш., 18.099394 в. д.,	Л., соцв.
Que	<i>Quercus rubra</i> L.	Словакия, г. Нитра. 48.303635 с. ш., 18.098976 в. д.,	Л., соцв.
Rey	<i>Reynoutria × bohemica</i> Chrték & Chrtková	Словакия. г. Нова Баня. 48.407742 с. ш., 18.632576 в. д.,	Л., соцв.
Rib	<i>Ribes aureum</i> Pursh	Россия, Московская обл., окрестности г. Звенигород. 55.779890 с. ш., 36.797929 в. д.,	Л., соцв.
Sca1	<i>Solidago canadensis</i> L. s.l.	Венгрия, г. Кечкемет. 46.776161 с. ш., 19.766722 в. д.,	Л., соцв.
Sca2	<i>Solidago canadensis</i> L. s.l.	Беларусь. Брестская обл. Ганцевичи. 52.746344 с. ш., 26.383355 в. д.,	Л., соцв.
Sca3	<i>Solidago canadensis</i> L. s.l.	Словакия. г. Нова Баня. 48.407742 с. ш., 18.632576 в. д.,	Л., соцв.
Sca4	<i>Solidago canadensis</i> L. s.str.	Венгрия, г. Кечкемет. 46.776161 с. ш., 19.766722 в. д.,	Л., соцв.
Sgi1	<i>Solidago gigantea</i> Ait.	Словакия. г. Нова Баня. 48.407742 с. ш., 18.632576 в. д.,	Л., соцв.
Sgi2	<i>Solidago gigantea</i> Ait.	Венгрия, г. Дунайварош. 46.891718 с. ш., 18.964720 в. д.,	Л., соцв.
Sni1	<i>Solidago × niedereideri</i> Khek	Россия, окрестности г. Калуга, 1. 54.523053 с. ш., 36.120148 в. д.,	Л., соцв.
Sni2	<i>Solidago × niedereideri</i> Khek	Россия, окрестности г. Калуга, 2. 54.523053 с. ш., 36.120148 в. д.,	Л., соцв.
Sni3	<i>Solidago × niedereideri</i> Khek	Россия. Псков. 57.801945 с. ш., 28.260243 в. д.,	Л., соцв.
Ssn1	<i>Solidago × snarskii</i> Gudž. & Žaln.	Россия, окрестности г. Калуга, 1. 54.530126 с. ш., 36.141434 в. д.,	Л., соцв.
Ssn2	<i>Solidago × snarskii</i> Gudž. & Žaln.	Россия, окрестности г. Калуга, 2. 54.530126 с. ш., 36.141434 в. д.,	Л., соцв.
Ssn3	<i>Solidago × snarskii</i> Gudž. & Žaln.	Россия, окрестности г. Калуга, 3. 54.530126 с. ш., 36.141434 в. д.,	Л., соцв.
Ssn4	<i>Solidago × snarskii</i> Gudž. & Žaln.	Россия, окрестности г. Калуга, 4. 54.530126 с. ш., 36.141434 в. д.,	Л., соцв.
Sor	<i>Sorbaria sorbifolia</i> (L.) A.Braun	Россия, Московская обл., окрестности г. Звенигород. 55.772274 с. ш., 36.800963 в. д.,	Л., бутоны и цветки
Sym	<i>Symphytotrichum × salignum</i> (Willd.) G.L.Nesom	Россия, Московская обл., окрестности г. Звенигород. 55.784166 с. ш., 36.795871 в. д.,	Л., соцв.
Ver	<i>Veronica filiformis</i> Sm.	Россия, Московская обл., окрестности г. Звенигород. 55.782430 с. ш., 36.796307 в. д.,	Л., соцв.

При анализе полученных данных использовали среднее значение и стандартное отклонение в трёх повторностях. Статистический анализ выполнен в программе PAST 2.17. Данные проанализированы с помощью теста ANOVA, различия между средними значениями признака проверены по критерию множественных сравнений Тьюки Крамера ($p < 0.05$).

Результаты

Антиоксидантная активность соединений в листьях. Антиоксидантная активность 51 образца растительных экстрактов 39 инвазионных таксонов была оценена с помощью активности удаления свободных радикалов. Активность захвата свободных радикалов в метанольных экстрактах листьев колебалась от 37,2 до 94,10% и в среднем составила $80,86 \pm 11,88$; в этанольных экстрактах – от 18,25 до 91,52%, в среднем $72,46 \pm 18,72$; в водных экстрактах – от 17,41 до 89,17%, в среднем $46,59 \pm 18,06$.

Образцы разделились на два кластера (рис. 1). В состав первого кластера вошли образцы с наименьшей антирадикальной активностью: центроид кластера образцов с процентом ингибирования радикала DPPH в метанольных экстрактах составил 67,48%, в этанольных экстрактах – 45,11 и 39,15% – в водных экстрактах. В первый кластер вошло 12 таксонов: *Acer negundo*, *Adenocaulon adhaerescens*, *Amaranthus retroflexus*, *Amelanch-*

ier spicata, *Erigeron canadensis*, *Echinocystis lobata*, *Galinsoga parviflora*, *G. quadriradiata*, *Hordeum jubatum*, *Impatiens parviflora*, *Phytolacca americana*, *Solidago* × *snarskissii*. Минимальная активность захвата свободных радикалов зафиксирована в листьях *Hordeum jubatum*: 37,20% – в метанольном, 18,25% – в этанольном, 18,78% – в водном экстрактах.

Второй кластер содержал существенно больше видов с повышенным количеством соединений антирадикальной активности: центроид кластера характеризовался 85,44% ингибирования свободного радикала DPPH в метанольных экстрактах, в этанольных и водных экстрактах – 81,82 и 49,14% соединений соответственно. Дистанция между центроидами первого и второго кластера – 42,07.

Второй кластер разделился на два подкластера, один из которых как бы промежуточный, а второй подкластер включал 19 таксонов с максимальным количеством соединений антиоксидантной активности в листьях: *Adenocaulon adhaerescens* (всходы), *Symphyotrichum* × *salignum*, *Bidens* × *decipiens*, *Buddleja davidii*, *Erigeron canadensis*, *E. sumatrensis*, *Erigeron annuum*, *Helianthus tuberosus*, *Impatiens glandulifera*, *Lupinus polyphyllus*, *Oenothera biennis*, *Parthenocissus inserta*, *Veronica filiformis*, и все 6 таксонов, в том числе и гибридогенных, рода *Solidago*.

Обращает на себя внимание (рис. 2), что в первый подкластер второго кластера попа-

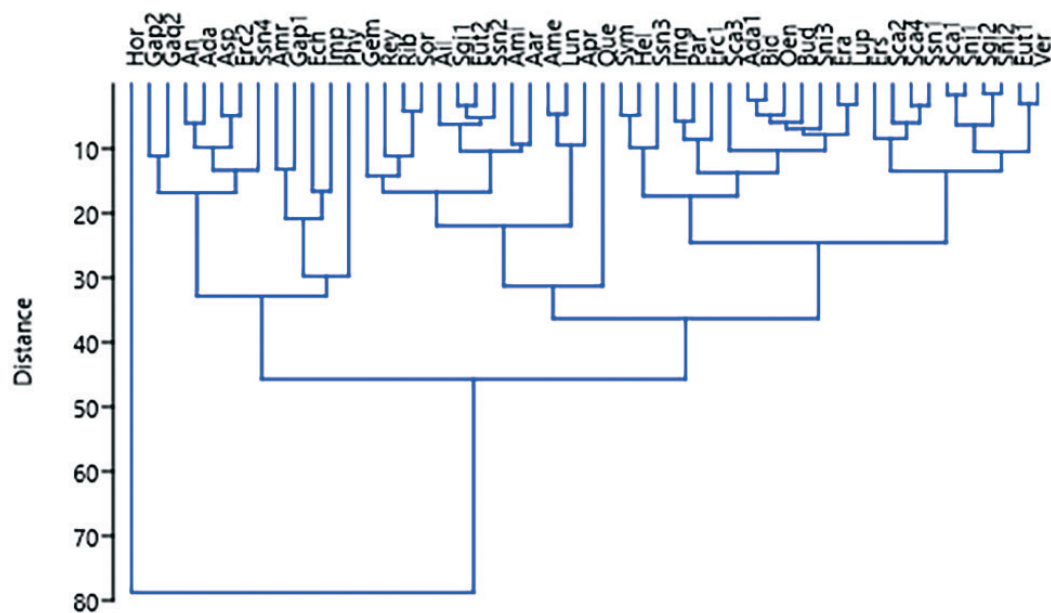


Рис. 1. Ранжирование инвазионных видов по антиоксидантной активности соединений в листьях.

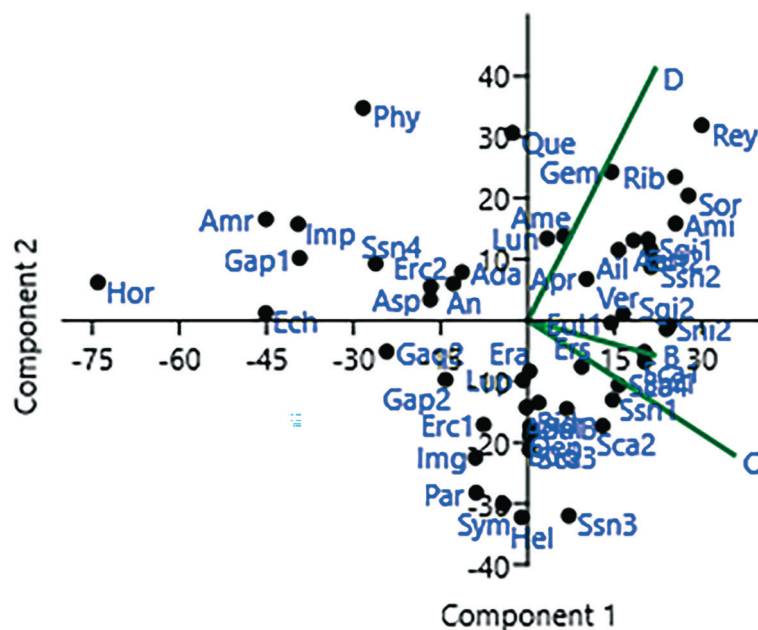


Рис. 2. Антирадикальная активность экстрактов листьев инвазивных видов: D – водного экстракта; B – метанольного экстракта; C – этанольного экстракта.

ли таксоны, которые имеют не очень высокие показатели антиоксидантной активности в спиртовых экстрактах, но довольно высокие – в водных экстрактах (на рис. 2 это правая верхняя группа образцов).

Ниже приводим перечень инвазивных видов с наивысшими показателями (табл. 2). Данные таблицы 2 демонстрируют возможность применения экстрактов инвазивных видов различными способами – как в виде спиртовых настоек или наливок (виды из 1-го и 2-го столбца табл. 2), так и в виде фиточаёв (виды из 3-го столбца табл. 2).

Антиоксидантная активность соединений в цветках или соцветиях растений. По количеству соединений антирадикальной активности общая выборка из 56 образцов 39 инвазивных таксонов характеризовалась следующими показателями: антиоксидантная активность соединений в метанольных экстрактах изменялась от 30,3 до 94,07% и в среднем составила $84,67 \pm 11,89$; в этанольных экстрактах – от 22,5 до 95,66%, в среднем $76,58 \pm 19,5$; в водных экстрактах – от 13,46 до 90,56%, в среднем $49,63 \pm 19,04$.

Образцы разделились на три кластера (рис. 3). Дистанция между центроидами первого и второго кластера – 58,93, между центроидами второго и третьего кластера – 32,60, между центроидами первого и третье-

го кластера – 57,641.

Образцы из первого кластера содержали наименьшее количество соединений антирадикальной активности: центроид кластера образцов с процентом ингибирования радикала DPPH в метанольных экстрактах составил 63,56%, в этанольных и водных экстрактах – 35,59 и 35,98% соответственно. В первый кластер вошло 7 таксонов: *Amaranthus retroflexus*, *Echinocystis lobata*, *Galinsoga quadriradiata*, *Hordeum jubatum*, *Lupinus polyphyllus*, *Oenothera biennis* и *Phytolacca americana*.

Минимальное количество соединений антирадикальной активности содержали цветки: в метанольном – *Lupinus polyphyllus* (30,30%), в этанольном – *Amaranthus retroflexus* (22,50%), в водном экстрактах – *Echinocystis lobata* (13,46%).

Образцы второго кластера (12 таксонов) содержали среднее количество соединений антирадикальной активности: центроид кластера образцов с процентом ингибирования радикала DPPH в метанольных экстрактах составил 86,87%, в этанольных и водных экстрактах – 74,79 и 73,29% соответственно.

Наиболее многочисленным оказался третий кластер, который включает таксоны с наибольшим количеством соединений с антиоксидантной активностью: центроид кластера характеризовался в метанольных, эта-

Таблица 2. Наиболее высокие показатели ингибирования свободных радикалов экстрактами листьев различных образцов инвазионных видов растений

В метанольном экстракте ≥ 90%	В этанольном экстракте ≥ 85%	В водном экстракте ≥ 65%
<i>Aronia arbutifolia</i> (Aar) 94,14±0,42	<i>Solidago snarskii</i> (Ssn3) 91,52±1,33	<i>Reynoutria×bohemica</i> (Rey) 89,17±1,94
<i>Aronia prunifolia</i> (Apr) 94,04±0,64	<i>Solidago niedereideri</i> (Sni2) 91,45±0,34	<i>Ribes aureum</i> (Rib) 80,14±0,81
<i>Solidago gigantea</i> (Sgi2) 92,77±1,04	<i>Solidago gigantea</i> (Sgi2) 90,89±1,63	<i>Sorbaria sorbifolia</i> (Sor) 78,28±2,60
<i>Aronia mitschurinii</i> (Ami) 92,58±0,66	<i>Solidago niedereideri</i> (Sni1) 90,78±0,40	<i>Geum macrophyllum</i> (Gem) 75,29±1,88
<i>Solidago niedereideri</i> (Sni2) 91,54±1,24	<i>Solidago canadensis</i> (Sca2) 90,21±0,46	<i>Aronia mitschurinii</i> (Ami) 72,12±0,99
<i>Solidago niedereideri</i> (Sni1) 91,12±1,51	<i>Solidago canadensis</i> (Sca1) 90,14±1,76	<i>Quercus rubra</i> (Que) 70,51±4,56
<i>Solidago canadensis</i> (Sca1) 90,56±0,93	<i>Solidago snarskii</i> (Ssn1) 90,03±1,54	<i>Euthamia graminifolia</i> (Eut2) 68,51±2,28
<i>Aronia melanocarpa</i> (Ame) 90,34±0,50	<i>Solidago canadensis</i> (Sca4) 88,71±1,26	<i>Solidago gigantea</i> (Sgi1) 66,95±1,63
<i>Solidago snarskii</i> (Ssn3) 90,33±1,63	<i>Veronica filiformis</i> (Ver) 87,59±0,61	<i>Aronia arbutifolia</i> (Aar) 65,67±1,54
<i>Solidago canadensis</i> (Sca4) 90,32±1,18	<i>Sorbaria sorbifolia</i> (Sor) 86,94±0,76	<i>Ailanthus altissima</i> (Ail) 64,60±2,19

нольных и водных экстрактах 88,72; 86,95 и 43,11% ингибирования свободного радикала DPPH соответственно. В третий кластер вошли 20 таксонов: *Acer negundo* (♂ цветки), *Adenocaulon adhaerescens*, *Symphyotrichum ×salignum*, *Bidens×decipiens*, *Buddleja davidii*, все 8 образцов 4 видов рода *Erigeron*, *Galinsoga parviflora*, *Helianthus tuberosus*, *Impatiens parviflora*, *Lunaria rediviva*, *Veronica*

filiformis и все 15 образцов 6 таксонов рода *Solidago*.

Аналогично результатам исследования листьев имеются таксоны, которые содержат не слишком высокое количество соединений антирадикальной активности в спиртовых растворах и очень высокое – в водных растворах цветков и соцветий (рис. 4, верхний правый угол).

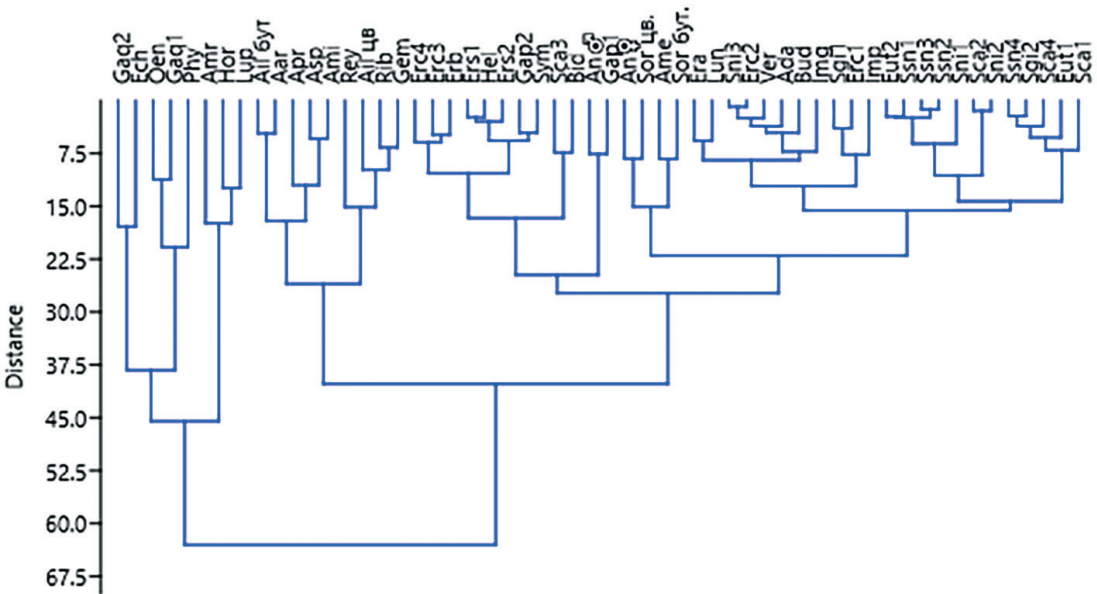


Рис. 3. Ранжирование инвазионных видов по количеству соединений антирадикальной активности в цветках/соцветиях.

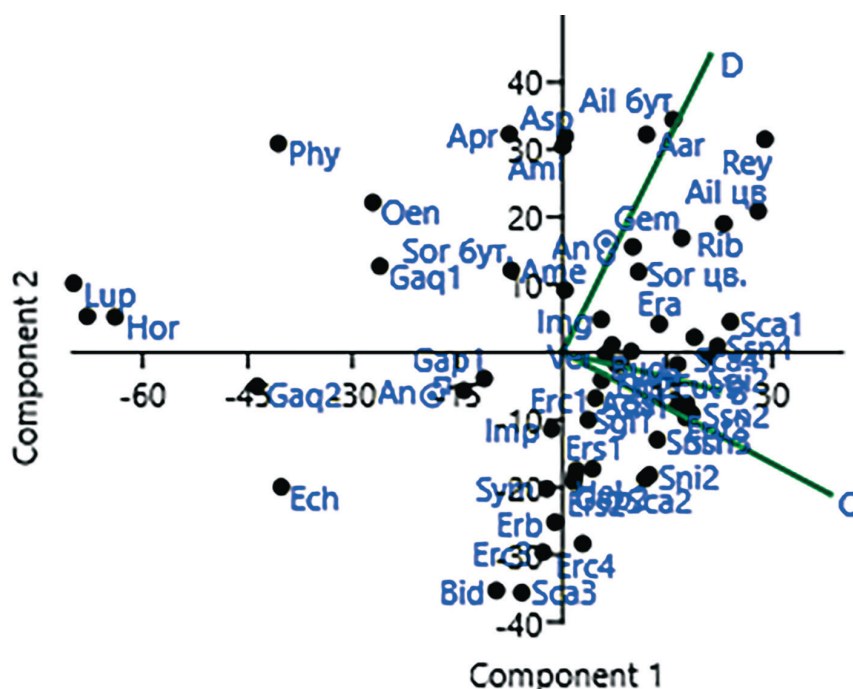


Рис. 4. Антирадикальная активность экстрактов цветков/соцветий инвазивных видов: D – водного экстракта; B – метанольного экстракта; C – этанольного экстракта.

Ниже приводим перечень образцов инвазивных видов с наивысшими показателями антиоксидантной активности (табл. 3).

Некоторые виды (*Adenocaulon adhaerescens*, *Erigeron canadensis*, *Solidago* × *snarskii*), по-видимому, содержат сложный комплекс полифенольных соединений, что обусловило их высокие позиции в нескольких группах. В основном это связано с различающимися почвенно-климатическими условиями произрастания и гибридным происхождением таксона (рис. 5). Поэтому в дальнейшем необходимо провести более детальное исследование наиболее перспективных инвазивных видов для отбора хеомас с наиболее высоким количеством соединений антиоксидантной активности.

Обсуждение

В настоящее время в большом объеме проводятся фитохимические исследования с целью выявления широкого спектра природных соединений, присутствующих в растительных экстрактах, поскольку именно применение растений позволяет снизить риск заболеваний, этиология которых связана с иммунной дисфункцией или постоянным воспалением. Кроме того, биоактивные соединения растений могут регулировать окислительный стресс, вызванный дисбалансом в производстве активных форм кислорода и антиоксидантной способности клеточных ферментов [Yashin et al., 2013]. Высокое количество свободных радикалов в клетках создает условия, при которых свободные радикалы

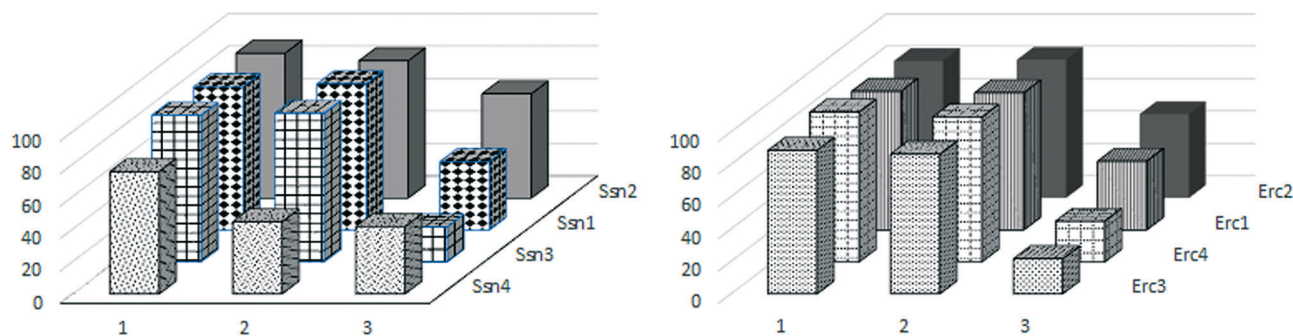


Рис. 5. Вариабельность антиоксидантной активности: слева – экстрактов листьев *Solidago* × *snarskii* в зависимости от гибридной природы образца; справа – экстрактов соцветий *Erigeron canadensis* в зависимости от пункта сбора образца; 1 – метанольный экстракт; 2 – этанольный экстракт; 3 – водный экстракт.

Таблица 3. Наиболее высокие показатели ингибирования свободных радикалов экстрактами цветков или соцветий различных образцов инвазионных видов растений

В метанольном экстракте $\geq 92\%$	В этанольном экстракте $\geq 90\%$	В водном экстракте $\geq 60\%$
<i>Solidago gigantea</i> (Sgi2) 94,07 $\pm$ 0,63	<i>Solidago snarskii</i> (Ssn2) 95,66 $\pm$ 2,06	<i>Reynoutria</i> $\times$ <i>bohemica</i> (Rey) 90,56 $\pm$ 0,90
<i>Solidago canadensis</i> (Sca2) 93,94 $\pm$ 2,38	<i>Solidago snarskii</i> (Ssn3) 94,90 $\pm$ 1,47	<i>Ailanthus altissima</i> б.м. (Ail) 87,05 $\pm$ 3,07
<i>Solidago snarskii</i> (Ssn4) 93,83 $\pm$ 0,51	<i>Solidago canadensis</i> (Sca1) 94,81 $\pm$ 1,87	<i>Aronia arbutifolia</i> (Aar) 83,26 $\pm$ 0,93
<i>Euthamia graminifolia</i> (Eut2) 93,66 $\pm$ 1,15	<i>Solidago snarskii</i> (Ssn4) 93,90 $\pm$ 2,98	<i>Ailanthus altissima</i> цв. (Ail) 80,69 $\pm$ 1,53
<i>Solidago canadensis</i> (Sca4) 93,25 $\pm$ 0,8	<i>Solidago niedereideri</i> (Sni2) 93,68 $\pm$ 2,30	<i>Amelanchier spicata</i> (Ame) 78,13 $\pm$ 2,23
<i>Solidago niedereideri</i> (Sni2) 93,12 $\pm$ 1,89	<i>Solidago snarskii</i> (Ssn1) 93,67 $\pm$ 1,99	<i>Ribes aureum</i> (Rib) 77,46 $\pm$ 0,75
<i>Solidago snarskii</i> (Ssn3) 93,08 $\pm$ 1,87	<i>Euthamia graminifolia</i> (Eut2) 93,65 $\pm$ 1,53	<i>Aronia mitschurinii</i> (Ami) 77,22 $\pm$ 0,31
<i>Reynoutria</i> $\times$ <i>bohemica</i> (Rey) 92,95 $\pm$ 1,24	<i>Solidago niedereideri</i> (Sni1) 93,21 $\pm$ 0,24	<i>Aronia prunifolia</i> (Apr) 74,34 $\pm$ 1,25
<i>Ailanthus altissima</i> цв. (Ail) 92,89 $\pm$ 1,35	<i>Solidago gigantea</i> (Sgi2) 93,20 $\pm$ 0,83	<i>Geum macrophyllum</i> (Gem) 72,78 $\pm$ 0,64
<i>Solidago snarskii</i> (Ssn2) 92,75 $\pm$ 2,76	<i>Solidago canadensis</i> (Sca2) 92,90 $\pm$ 1,35	<i>Acer negundo</i> ♀ (An) 67,46 $\pm$ 1,46
<i>Erigeron canadensis</i> (Erc4) 92,40 $\pm$ 1,84	<i>Euthamia graminifolia</i> (Eut1) 90,68 $\pm$ 1,56	<i>Sorbaria sorbifolia</i> цв. (Sor) 65,27 $\pm$ 1,22
<i>Solidago canadensis</i> (Sca1) 92,28 $\pm$ 2,32	<i>Ailanthus altissima</i> цв. (Ail) 90,51 $\pm$ 0,71	<i>Solidago canadensis</i> (Sca1) 64,38 $\pm$ 1,35
<i>Acer negundo</i> ♀ (An) 91,88 $\pm$ 7,03	<i>Solidago canadensis</i> (Sca4) 90,20 $\pm$ 2,37	<i>Solidago snarskii</i> (Ssn4) 60,08 $\pm$ 3,20

окисляют стенки кровеносных сосудов, белковые молекулы, ДНК, углеводы и липиды. Наиболее активные свободные радикалы разрушают связи в молекулах ДНК и повреждают генетический аппарат клеток, регулирующий их рост, что может привести к образованию раковых клеток. Окисленные липопротеины низкой плотности могут откладываться на стенках кровеносных сосудов, что приводит к атеросклерозу и сердечно-сосудистым заболеваниям. Окислительный стресс также играет ключевую роль в патогенезе старения. Окислительный стресс можно уменьшить с помощью антиоксидантной терапии, то есть употреблением определённого количества природных антиоксидантов, содержащихся в растениях; такой подход является более информативным [Кураева, Kotenkova, 2021]. Антирадикальную активность различных видов растений изучают сейчас в массовом масштабе [Villano et al., 2007; Tirzitis, Bartosz, 2010; Mishra et al., 2012]. Особенно велико ко-

личество исследований растительных препаратов (более 1000 наименований) традиционной китайской медицины [Яшин и др., 2017].

Известно, что радикал DPPH является мерой неферментативной антиоксидантной активности растительных экстрактов: чем выше значения DPPH, тем выше антиоксидантная активность. Метод DPPH применялся для оценки антирадикальной активности многих видов – *Tussilago farfara* L. и *Cetraria islandica* (L.) Ach. [Ivanišová et al., 2016], спиртовых экстрактов коры *Acacia auriculiformis* A. Cunn. [Singh et al., 2007], листьев *Diospyros ebenum* Roxb. [Baravalia et al., 2009] и др.

Как мы и ожидали, большинство инвазионных видов содержали высокие уровни биоактивных веществ: полученные ранее результаты показали, что у инвазионных видов антиоксидантная активность зачастую выше, чем у большинства аборигенных растений, используемых в традиционной медицине, в том числе и у растений, входящих в офи-

циальную фармакопею. Именно такая высокая антиоксидантная активность выявлена у видов рода *Galinsoga* [Vinogradova et al., 2019], комплекса видов *Aronia* [Vinogradova et al., 2020a], *Adenocaulon adhaerescens* [Vinogradova et al., 2020b]. Показано, что экстракты инвазионных *Solidago canadensis* и *S. gigantea* имеют более высокую антирадикальную активность, чем аборигенный вид *S. virgaurea* L. [Shelepova et al., 2020]. Определена антирадикальная активность *Echinocystis lobata* [Vinogradova et al., 2021].

Антиоксидантный потенциал может быть обусловлен наличием фенольных кислот и флавоноидов. Каждое фенольное соединение обеспечивает антиоксидантный потенциал по-разному, и его эффект тесно связан со структурой. Например, рутин и кверцетин содержат вицинилдигидроксильные группы, и их присутствие влияет на способность фенолов ингибировать катализируемое железом и медью производство иницирующих радикальных видов. Поэтому вполне вероятно, что свойства хелатирования металлов и/или захвата свободных радикалов способствуют ингибированию автоокисления глюкозы метаболитами рутина и кверцетина, которые содержат вицинильные дигидроксильные группы. С другой стороны, хлорогеновая кислота ингибирует окисление липидов в эмульсии типа «масло в воде» посредством комплексного эффекта, хелатирования металлов в гидрофильной фазе и захвата свободных радикалов в гидрофобной фазе [Shelepova et al., 2020].

В данной работе мы постарались как можно более расширить выборку объектов с перспективой на более детальные исследования межпопуляционной изменчивости биохимических особенностей инвазионных видов с наиболее высоким содержанием веществ антиоксидантной активности.

Заключение

Все исследованные инвазионные виды активно ингибируют окислительные процессы и, следовательно, могут формировать антиоксидантную защиту в условиях окислительного стресса. Наиболее выражены

ми антиоксидантными свойствами обладают спиртовые экстракты соцветий у всех видов рода *Solidago* и у *Ailanthus altissima* и спиртовые экстракты листьев видов рода *Solidago*, *Veronica filiformis* и *Sorbaria sorbifolia*. У водных растворов антиоксидантная активность в целом несколько ниже: наибольшая антиоксидантная активность была отмечена в листьях *Reynoutria × bohemica*, *Ribes aureum* и *Sorbaria sorbifolia* и в соцветиях *Reynoutria × bohemica* и *Ailanthus altissima*. Благодаря высокой антиоксидантной активности инвазионные растения являются перспективным ресурсом для использования в медицинской практике. В будущем это растительное сырье может стать аналогом многих лекарственных препаратов, применяемых для лечения заболеваний различной этиологии, сопровождающихся усилением свободнорадикальных механизмов.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам и стажерам Института сохранения биоразнообразия Словацкого сельскохозяйственного Университета в Нитре: Яну Бриндзе, Ольге Григорьевой и Елене Вергун.

Финансирование работы

Работа проведена по теме государственного задания ГБС РАН «Инвазионные растения России: инвентаризация, биоморфологические особенности и эффективные методы контроля расселения», № 122042600141-3.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов

Статья не содержит никаких исследований с участием животных в экспериментах, выполненных кем-либо из авторов.

Литература

Виноградова Ю., Куклина А., Бриндза Я. Инвазионные виды растений для хозяйственного использования и здоровья. Нитра (Словакия). 2019. 163 с.
Яшин Я.И., Веденин А.Н., Яшин А.Я. Лекарственные препараты, лекарственные растения и БАДы с анти-

- оксидантной активностью // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17, № 3. С. 496–505.
- Baravalia Y., Kaneria M., Vaghasiya Y., Parekh J., Chanda S. Antioxidant and antibacterial activity of *Diospyros ebenum* Roxb. leaf extracts // Turk. J. Biol. 2009. Vol. 33. P. 159–164.
- Brand-Williams W., Cuvelier M.E., Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. Lebensmittel Wissenschaften und Technologie. 1995. Vol. 28, № 1. P. 25–30 [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Callaway R.M., Aschehoug E.T. Invasive plants versus their new and old neighbors: a mechanism for exotic invasion // Science. 2000. Vol. 290, No 5491. P. 521–523.
- Cappuccino N., Arnason J.T. Novel chemistry of invasive exotic plants // Biology letters. 2006. Vol. 2, No 2. P. 189–193.
- Chanda S., Dave R. In vitro models for antioxidant activity evaluation and some medicinal plants possessing antioxidant properties: An overview // African Journal of Microbiology Research. 2009. Vol. 3, No 13. P. 981–996.
- Dawidowicz A.L., Olszowy M., Jóźwik-Doleba M. Antagonistic antioxidant effect in butylated hydroxytoluene/butylated hydroxyanisole mixture // Journal of Food Processing and Preservation. 2015. Vol. 39. P. 2240–2248.
- Huang C., Asner G.P. Applications of remote sensing to alien invasive plant studies // Sensors. 2009. Vol. 9, No 6. P. 4869–4889.
- Ivanišová E., Kačániová M., Petrová J., Frančáková H., Tokár M. The Evaluation of Antioxidant and Antimicrobial Effect of *Tussilago farfara* L. and *Cetraria islandica* L. // Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies. 2016. Vol. 49, No 2. P. 46–51.
- Kupaeva N.V., Kotenkova E. A. Current view on the assessment of antioxidant and antiradical activities: A mini review // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing. 2021. Vol. 854, No 1. P. 012048.
- Mack R.N. Predicting the identity and fate of plant invaders: emergent and emerging approaches // Biological conservation. 1996. Vol. 78, No 1-2. P. 107–121.
- Miguel M.G. Antioxidant activity of medicinal and aromatic plants. A review // Flavour and Fragrance Journal. 2010. Vol. 25, No 5. P. 291–312.
- Mishra K., Ojha H., Chaudhury N.K. Estimation of antiradical properties of antioxidants using DPPH assay: A critical review and results // Food chemistry. 2012. Vol. 130, No 4. P. 1036–1043.
- Mu J., Uehara T., Li J., Furuno T. Identification and evaluation of antioxidant activities of bamboo extracts // Forestry Studies in China. 2004. No 6. P. 1–5.
- Olszowy M., Dawidowicz A.L. It is possible to use the DPPH and ABTS methods for reliable estimation of antioxidant power of colored compounds? // Chemical Papers. 2018. Vol. 72. P. 393–400.
- Olszowy M. What is responsible for antioxidant properties of polyphenolic compounds from plants? // Plant Physiology and Biochemistry. 2019. Vol. 144. P. 135–143.
- Pizzino G., Irrera N., Cucinotta M., Pallio G., Mannino F., Arcoraci V., Squadrito F., Altavilla D., Bitto, A. Oxidative stress: harms and benefits for human health // Oxidative medicine and cellular longevity. 2017. Vol. 1. P. 8416763.
- Shelepova O., Vinogradova Yu., Vergun O., Grygorieva O., Brindza J. Assessment of Flavonoids and Phenolic Compound Accumulation in Invasive *Solidago canadensis* L. in Slovakia // Slovak Journal of Food Sciences. 2020. Vol. 14. P. 587–594. <https://doi.org/10.5219/1378>
- Singh R., Singh S., Kumar S., Arora S. Evaluation of antioxidant potential of ethyl acetate extract/fractions of *Acacia auriculiformis* A. Cunn. // Food Chem. Toxicol. 2007. Vol. 45: P. 1216–1223.
- Tirzitis G., Bartosz G. Determination of antiradical and antioxidant activity: basic principles and new insights // Acta biochimica polonica. 2010. Vol. 57, No 2. P. 139–142.
- Villano D., Fernandez-Pachon M.S., Moya M.L., Troncoso A.M., Garcia Parilla M.C. Radical scavenging ability of phenolic compounds towards DPPH free radical // Talanta. 2007. Vol. 71. P. 230–235.
- Vinogradova Yu., Vergun O., Grygorieva O., Brindza J. Antioxidant activity of alien *Galinsoga* species // Agrobiodiversity for improve the Nutrition, Health and Quality of Human and Bees Life. 4th International scientific Conference. Abstracts Book. Nitra. 2019. P. 150.
- Vinogradova Yu., Vergun O., Grygorieva O., Ivanišová E., Brindza Ján. Comparative Analysis of Antioxidant Activity and Phenolic Compounds in the Fruits of *Aronia* spp. // Slovak Journal of Food Sciences. 2020a. Vol. 14. P. 393–401. <https://doi.org/10.5219/1360>
- Vinogradova Yu., Shelepova O., Vergun O., Ganina A. Possibility of using an invasive species *Adenocaulon adhaerescens* Maxim. (Asteraceae) as a medicinal plant // Agrobiodiversity for improving nutrition, health and life quality. 2020b. Vol. 4. P. 59–69. <https://doi.org/10.15414/agrobiodiversity.2020.2585-8246.059-6>
- Vinogradova Yu., Shelepova O., Vergun O., Grygorieva O., Brindza J. Phenolic content and antioxidant activity of *Echinocystis lobata* (Mich) Torr, et Gray (Cucurbitaceae) // Slovak Journal of Food Sciences. 2021. Vol. 15. P. 784–791. <http://doi.org/10.5219/1579>
- Yashin A., Yashin Y., Wang J.Y., Nemzer B. Antioxidant and antiradical activity of coffee // Antioxidants. 2013. Vol. 2, No 4. P. 230–245.

SCREENING OF INVASIVE PLANT SPECIES FOR SUBSTANCES OF ANTIOXIDANT ACTIVITY

Vinogradova Yu.K.*, Shelepova O.V.**

Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 127275 Russia
e-mail: *gbsad@mail.ru; **shov_gbsad@mail.ru

The search for natural antioxidants due to their role in minimizing the harmful effects of oxidative stress on the human body is becoming more and more relevant. The hypothesis of the increased level of secondary metabolites in invasive species has been put forward, because in the secondary range the plants grow under stressful environmental conditions. Targeted screening of the most aggressive invasive species for the presence of substances of antioxidant activity in them was carried out. The DPPH method was used to determine the antioxidant activity of extracts of leaves (51 samples) and inflorescences (56 samples) of 39 invasive plant species collected in different regions of Europe. It has been shown that all investigated invasive species actively inhibit oxidative processes and, therefore, can form antioxidant defense under oxidative stress. Alcoholic extracts of inflorescences of all *Solidago* species and *Ailanthus altissima* and alcoholic extracts of leaves of *Solidago* species, *Veronica filiformis* and *Sorbaria sorbifolia* have the highest antioxidant activity. In aqueous solutions, the antioxidant activity is in general somewhat lower: the greatest amount of substances with antioxidant activity was observed in the leaves of *Reynoutria×bohemica*, *Ribes aureum* and *Sorbaria sorbifolia* and in the inflorescences of *Reynoutria×bohemica* and *Ailanthus altissima*. Due to their high antioxidant activity, the invasive plants are a promising resource for use in medical practice.

Keywords: invasive species, oxidative stress, antioxidant compounds, resource potential.