

---

---

# ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

---

## INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

---

---

УДК 634.737:581.5:581.522.4(476)

### ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ВЕГЕТАТИВНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ НА АНТИОКСИДАНТНЫЙ КОМПЛЕКС ПЛОДОВ СОРТОВ *VACCINIUM CORYMBOSUM* L.

Ж. А. РУПАСОВА<sup>1)</sup>, В. С. ЗАДАЛЯ<sup>1)</sup>, О. В. ЧИЖИК<sup>1)</sup>, В. Л. ФИЛИПЕНЯ<sup>1)</sup>, Н. Б. ПАВЛОВСКИЙ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Центральный ботанический сад Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Сурганова, 2в, 220012, г. Минск, Беларусь

---

#### Образец цитирования:

Рупасова ЖА, Задаля ВС, Чижик ОВ, Филипня ВЛ, Павловский НБ. Влияние способа вегетативного размножения на антиоксидантный комплекс плодов сортов *Vaccinium corymbosum* L. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2021;2:74–83.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-74-83>

#### For citation:

Rupasova ZhA, Zadalya VS, Chizhik OV, Filipenia VL, Pavlovsky NB. Vegetative propagation method influence on the antioxidant complex of *Vaccinium corymbosum* L. cultivars. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;2:74–83. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-2-74-83>

---

#### Авторы:

**Жанна Александровна Рупасова** – доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси; заведующий лабораторией химии растений.

**Виктория Сергеевна Задаля** – научный сотрудник лаборатории химии растений.

**Ольга Владимировна Чижик** – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией клеточной биотехнологии.

**Вероника Леонидовна Филипня** – заведующий производственным отделом «Биотехнологический комплекс».

**Николай Болеславович Павловский** – кандидат биологических наук; заведующий лабораторией интродукции и технологии ягодных растений.

#### Authors:

**Zhanna A. Rupasova**, doctor of science (biology), full professor; corresponding member of the National Academy of Sciences of Belarus; head of the laboratory of chemistry of plants.

*J.Rupasova@cbg.org.by*

**Victoria S. Zadalya**, researcher at the laboratory of chemistry of plants.

*zada.93@mail.ru*

**Olga V. Chizhik**, PhD (biology), docent; head of the laboratory of cell biotechnology.

*chizhikolga17@gmail.com*

**Veronika L. Filipenia**, head of production at the department «Biotechnological complex».

*veronica\_filipenia@yahoo.com*

**Nikolay B. Pavlovsky**, PhD (biology); head of the laboratory of introduction and technology of berry plants.

*pavlovskiy@tut.by*

Приведены результаты сравнительного исследования в опытной культуре в центральной агроклиматической зоне Беларуси влияния способа вегетативного размножения растений (черенкованием и микроклональным) на антиоксидантную и ферментативную (каталаза, пероксидаза и полифенолоксидаза) активности плодов раннеспелого (Weymouth) и позднеспелых (Elizabeth и Atlantik) сортов *V. corymbosum* L. Показано, что на фоне существенных генотипических различий зависимости исследуемых характеристик антиоксидантного комплекса от способа размножения, плоды меристемных растений характеризовались на 5–21 % более высокой активностью каталазы (особенно пероксидазы) по сравнению с традиционными аналогами, но при этом на 13 % более низкой активностью полифенолоксидазы у сортов *Weymouth* и *Atlantik* и на 8 % более высокой у сорта *Elizabeth*. На основе анализа корреляционных связей между обозначенными компонентами антиоксидантного комплекса плодов растений, полученных разными способами, с одной стороны, и содержанием в них аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, пектиновых веществ, собственно антоцианов, лейкоантоцианов, катехинов и флавонолов, с другой, установлены различия между меристемными и традиционными растениями по источникам антиоксидантной и ферментативной активности.

**Ключевые слова:** голубика; сорта; черенкование и микроклональные способы вегетативного размножения; плоды; антиоксидантная активность; ферменты; каталаза; пероксидаза; полифенолоксидаза.

## VEGETATIVE PROPAGATION METHOD INFLUENCE ON THE ANTIOXIDANT COMPLEX OF *VACCINIUM CORYMBOSUM* L. CULTIVARS

Zh. A. RUPASOVA<sup>a</sup>, V. S. ZADALYA<sup>a</sup>, O. V. CHIZHIK<sup>a</sup>, V. L. FILIPENIA<sup>a</sup>, N. B. PAVLOVSKY<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Central Botanical Garden, National Academy of Sciences of Belarus,  
2v Surganova Street, Minsk 220012, Belarus

Corresponding author: Zh. A. Rupasova (J.Rupasova@cbg.org.by)

There are presented the results of a comparative study in an experimental culture in the central agro-climatic zone of Belarus, the influence of the method vegetative propagation of plants (cuttings and microclonal) on antioxidant and enzymatic (catalase, peroxidase and polyphenol oxidase) activity of fruits of early ripening (Weymouth) and late ripening (Elizabeth and Atlantik) varieties *V. corymbosum* L. It was shown that against the background of significant genotypic differences dependence of the studied characteristics of the antioxidant complex on the method reproduction, the fruits of meristemic plants were characterized by 5–21 % higher activity of catalase and especially peroxidase in comparison with traditional analogues, but at the same time 13 % lower activity of polyphenol oxidase in varieties *Weymouth* and *Atlantik* and 8 % higher in *Elizabeth*. Based on analysis correlations between the indicated components of the antioxidant a complex of plant fruits obtained in different ways, on the one hand, and the content in them of ascorbic and hydroxycinnamic acids, pectin substances, actually anthocyanins, leucoanthocyanins, catechins and flavonols, on the other hand, the differences between meristem and traditional plants have been established according to sources of antioxidant and enzymatic activity.

**Keywords:** blueberry; cultivars; cutting and microclonal methods of vegetative propagation; berries; antioxidant activity; enzymes; catalase; peroxidase; polyphenol oxidase.

### Введение

В связи с прогрессирующим увеличением в Беларуси площадей промышленных плантаций голубики высокорослой (*Vaccinium corymbosum* L.), существенно возросли потребности специализированных хозяйств в посадочном материале данной культуры. Основным способом его получения является вегетативное размножение растений посредством укоренения стеблевых черенков, наряду с которым все большее распространение получает микроклональный способ размножения (*in vitro*), обладающий рядом преимуществ по сравнению с традиционным. В частности, он значительно ускоряет процесс получения оздоровленного посадочного материала и позволяет существенно увеличить коэффициент размножения одного маточного растения. Вместе с тем научная информация о влиянии традиционного и культурального способов вегетативного размножения на дальнейший рост, развитие, плодоношение и биохимический состав плодов интродуцированных сортов голубики в нашей стране весьма ограничена и носит фрагментарный характер [1].

Основная ценность ягодной продукции голубики высокорослой состоит в чрезвычайно высоком содержании в ней биофлавоноидов, обладающих Р-витаминным действием и являющихся общепризнанными антиоксидантами, прерывающими нарастающие процессы окисления с образованием малоактивных радикалов, которые легко выводятся из организма. Нашими исследованиями антиоксидантной активности (АОА) этанольных экстрактов из плодов ряда таксонов голубики в Припятском Полесье [2] были

установлены весьма высокие значения данного показателя, обусловленные значительным содержанием в них биофлавоноидов, в первую очередь антоциановых пигментов [3]. При этом на основе анализа парной корреляции между уровнем АОА и содержанием в плодах голубики органических соединений разной химической природы была доказана существенная роль в ее обеспечении, наряду с полифенолами, других биологически активных соединений. Вместе с тем на примере ряда модельных сортов голубики высокорослой разных сроков созревания было установлено заметное влияние способа вегетативного размножения растений на биохимический состав ягодной продукции, в том числе на содержание в ней биофлавоноидов и других потенциальных источников антиоксидантной активности [4]. В этой связи представлялось целесообразным исследовать влияние данного фактора на уровень антиоксидантной (АОА) и ферментативной активности плодов голубики, обеспечиваемой работой основных ферментов окислительно-восстановительного цикла – каталазы (КАТ), пероксидазы (ПО) и полифенолоксидазы (ПФО), а также на структуру корреляционных связей компонентов антиоксидантного комплекса с содержанием в них ряда биологически активных соединений.

### Материалы и методы исследований

С целью установления степени возможного влияния на обозначенные характеристики антиоксидантного комплекса плодов голубики способа вегетативного размножения растений, исследования проводились на научно-экспериментальной базе Центрального ботанического сада НАН Беларуси (Ганцевичский р-н Брестская обл.), расположенной в центральной агроклиматической зоне Беларуси в районе распространения легких песчаных дерново-подзолистых почв и осушенных верховых торфяников. В условиях сезона 2019 г. на фоне преобладания жаркой и засушливой погоды со значительными колебаниями температурных показателей и неравномерным выпадением атмосферных осадков было проведено сравнительное изучение в опытной культуре антиоксидантной и ферментативной активности плодов трех интродуцированных сортов *V. corymbosum* разных сроков созревания – раннеспелого *Weymouthi* двух позднеспелых *Elizabeth* и *Atlantic*, полученных традиционным (стеблевым черенкованием) и микроклональным способами вегетативного размножения.

Исследования были выполнены в рамках полевого эксперимента с пятилетними растениями голубики высокорослой после подтверждения генетической идентичности меристемных и традиционных растений обозначенных выше сортов на основе ПЦР-анализа. Определение антиоксидантной и ферментативной активности плодов осуществлялось в лаборатории химии растений Центрального ботанического сада НАН Беларуси.

В этанольных экстрактах из усредненных проб свежих плодов голубики определяли антиоксидантную активность с использованием 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (ДФПГ) [5; 6], активность пероксидазы – по методу А. Н. Бояркина [7]; полифенолоксидазы – с пирокатехином по методу [8], каталазы – по методу А. Н. Баха и А. И. Опарина [9].

Все аналитические определения выполнены в 3-кратной биологической повторности. Данные статистически обработаны с использованием программы Excel.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования выявили существенную зависимость уровня антиоксидантной и ферментативной активности ягодной продукции голубики от способа размножения и генотипа растений. Как следует из табл. 1, общий уровень антиоксидантной активности этанольных экстрактов из плодов модельных сортов *V. corymbosum* L., выраженный в мкмоль экв тролокса /г сухого вещества, варьировался при 10- и 30-минутной экспозициях у традиционных и клонированных растений в весьма широких и различающихся между собой диапазонах значений, составлявших в первом случае 50,6–85,6 и 55,5–70,9, во втором – 55,9–90,9 и 64,7–73,9.

Представляется вполне объяснимым соответствие уровня АОА при 30-минутной экспозиции области более высоких, нежели при 10-минутной, значений, поскольку соединения, обладающие активностью, в процессе взаимодействия с катион-радикалами при меньшей экспозиции обеспечивали хотя и основную, но все же неполный вклад в АОА, тогда как на последующей замедленной стадии, скорее всего, протекала реакция с катион-радикалами продуктов окисления биологически активных соединений, образовавшихся на начальной стадии процесса. Подобная закономерность была получена ранее в аналогичных исследованиях А. М. Макаревич и В. Н. Решетниковым [10].

Значительная ширина приведенных диапазонов варьирования уровня АОА косвенно свидетельствовала о его существенной зависимости от генотипа опытных растений, причем заметное их сужение у меристемных растений указывало на ослабление данной зависимости, по сравнению с растениями, выращенными *in vivo*, у которых наиболее высоким уровнем антиоксидантной активности плодов при обеих экспозициях характеризовался раннеспелый сорт *Weymouth*, тогда как наименьшим – позднеспелый сорт

*Elizabeth*. Клонированные же растения обоих позднеспелых сортов голубики, независимо от продолжительности реакции, характеризовались сходными, причем более высокими, чем у раннеспелого сорта, значениями данного показателя.

Таблица 1

Уровень антиоксидантной активности этанольных экстрактов из плодов клонированных и традиционных растений сортов *V. corymbosum* L. в мкмоль экв тролокса / г сухого вещества

Table 1

Antioxidant activity level of ethanol extracts from fruits of cloned and traditional plants of *V. corymbosum* L. cultivars in micromole equiv of trolox / g dry matter

Сорт	Способ размножения	АОА (ДФПГ <sup>-</sup> ) через 10 мин.		АОА (ДФПГ <sup>-</sup> ) через 30 мин.	
		$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	85,6±0,7		90,9±1,1	
	<i>in vitro</i>	55,5±1,6	-17,2*	64,7±1,0	-17,8*
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	50,6±0,8		55,9±1,4	
	<i>in vitro</i>	68,5±1,4	10,9*	72,2±0,5	11,1*
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	66,3±3,9		75,2±3,8	
	<i>in vitro</i>	70,9±7,0	0,6	73,9±8,1	-0,1

Примечание. Звездочка (\*) – статистически значимые по t-критерию Стьюдента различия при  $p < 0,05$ .

Результаты определения уровня активности основных окислительно-восстановительных ферментов в сухом веществе плодов опытных растений, приведенные в табл. 2, показали, что значения исследуемого показателя у традиционных и клонированных растений варьировались в соответствующих диапазонах значений: для каталазы (КАТ) – 5,72–7,68 и 6,03–8,01 мкмоль H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/(г·мин.), пероксидазы (ПО) – 3,14–4,59 и 3,79–4,86 ед. опт. плотн. / (г·мин), полифенолоксидазы (ПФО) – 466,7–525,6 и 404,4–564,8 ед. опт. плотн. / (г·мин). Приведенные диапазоны варьирования обозначенных признаков указывали на более высокий уровень ферментативной активности в плодах меристемных растений относительно традиционных. При этом, независимо от способа размножения растений, позднеспелые сорта голубики характеризовались довольно близкими, но при этом более высокими, чем у раннеспелого сорта, значениями активности КАТ и ПФО, но более низкими показателями активности ПО. Представление о степени влияния генотипа растений и способа их вегетативного размножения на антиоксидантную и ферментативную активность плодов опытных сортов голубики можно составить по данным табл. 3. Так, независимо от продолжительности реакции, уровень АОА этанольных экстрактов из плодов клонированных растений раннеспелого сорта уступал таковому традиционных на 29–35 %, тогда как у позднеспелого сорта *Elizabeth* превосходил его в аналогичном диапазоне значений при отсутствии различий по данному признаку у сорта *Atlantik*. При этом меристемные растения всех модельных сортов голубики характеризовались достоверно более высокой активностью в плодах КАТ и особенно ПО по сравнению с обычными растениями – на 5 и 6 % у сорта *Weymouth*, на 8 и 21 % у сорта *Elizabeth* и на 4 и 16 % у сорта *Atlantik*, но при этом на 13 % более низкой активностью ПФО у сортов *Weymouth* и *Atlantik* и на 8 % более высокой у сорта *Elizabeth*.

Общеизвестно, что в биологических системах в качестве антиоксидантов, наряду с биофлавоноидами, обладающими данными свойствами [11], могут выступать соединения иной химической природы, способные ингибировать процессы свободнорадикального окисления, в том числе каротиноиды, белки, органические кислоты и даже пектиновые вещества [12]. В связи с этим особый научный интерес представляло выявление в плодах голубики основных источников антиоксидантной и ферментативной активности в зависимости от генотипа и способа вегетативного размножения растений. С этой целью в плодах опытных объектов были определены значения коэффициентов парной корреляции между данными признаками и содержанием органических соединений, предположительно являющихся источниками данной активности. Для выявления компонентов биохимического состава плодов голубики, обеспечивающих наиболее высокий уровень последней, при анализе корреляционных связей мы ориентировались исключительно на наиболее тесные из них, определяемые абсолютными значениями коэффициента корреляции  $r > 0,70$  и представленные в табл. 4.

Как оказалось, из 168 статистических связей между содержанием в плодах трех опытных сортов голубики 7 видов органических соединений, являющихся предполагаемыми источниками исследуемой активности, с одной стороны, и уровнями АОА и трех окислительно-восстановительных ферментов – каталазы, пероксидазы и полифенолоксидазы, с другой, на долю наиболее сильных положительных связей

приходилось 37, или 22 % их общего количества, тогда как на долю аналогичных отрицательных связей – 50, или 30 %. При этом в обоих случаях наибольшим количеством наиболее тесных связей отличалось содержание гидроксикоричных кислот. Остальная часть корреляционных связей характеризовалась средней, умеренной, слабой и очень слабой силой. Установлено, что в большинстве случаев наиболее тесные связи между анализируемыми признаками носили индивидуальный характер для каждого таксона голубики, что свидетельствовало об их выраженной сортоспецифичности, и лишь для незначительной их части отмечено совпадение у опытных объектов. Так, у растений *in vivo* обоих позднеспелых сортов выявлена весьма тесная положительная связь между уровнем АОА, с одной стороны, и содержанием аскорбиновой и гидроксикоричных кислот, с другой. С остальными же предполагаемыми источниками антиоксидантной активности ее тесного прямого взаимодействия у данных сортов голубики не установлено, причем для основных компонентов Р-витаминного комплекса, за исключением флавонолов у сорта *Elizabeth* и лейкоантоцианов у сорта *Atlantik*, была показана довольно сильная обратная связь с уровнем АОА. В отличие от позднеспелых сортов, у традиционных растений раннеспелого сорта *Weymouth* обнаружена тесная положительная корреляция лишь с содержанием в плодах собственно антоцианов на фоне сильной обратной взаимосвязи с содержанием гидроксикоричных кислот и лейкоантоцианов при отсутствии заметной связи с другими органическими соединениями. Не составляет труда убедиться в наличии у традиционных растений голубики сортоспецифичности в обеспечении высокого уровня антиоксидантной активности за счет ее разных источников.

Таблица 2

**Активность окислительно-восстановительных ферментов  
в плодах клонированных и традиционных растений сортов *V. corymbosum* L. (в сухом веществе)**

Table 2

**Redox enzyme's activity in *V. corymbosum* L. cultivar's fruits of cloned and traditional plants (in dry matter)**

Сорт	Способ размножения	Активность КАТ, мкмоль H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /(г·мин)		Активность ПО, ед. опт. плотн. / (г·мин)		Активность ПФО, ед. опт. плотн. / (г·мин)	
		$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	<i>t</i>
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	5,72±0,01		4,59±0,03		466,7±2,5	
	<i>in vitro</i>	6,03±0,07	4,5*	4,86±0,03	6,3*	404,4±3,0	-16,2*
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	6,79±0,15		3,14±0,08		525,6±0,5	
	<i>in vitro</i>	7,31±0,07	3,6*	3,79±0,05	5,3*	564,8±3,9	9,9*
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	7,68±0,05		3,35±0,02		500,6±2,1	
	<i>in vitro</i>	8,01±0,08	3,4*	3,90±0,10	5,6*	436,9±1,4	-5,3*

Примечание. \*Статистически значимые по t-критерию Стьюдента различия при  $p < 0,05$ .

Таблица 3

**Относительные различия уровня антиоксидантной и ферментативной активности плодов  
сортов *V. corymbosum* L. при разных способах вегетативного размножения растений (*in vitro* / *in vivo*), %**

Table 3

**Relative differences in the level of antioxidant and enzymatic activity of *V. corymbosum* L. cultivar's fruits (*in vitro* / *in vivo*), %**

Показатель	Сорт			
	<i>Weymouth</i>	<i>Bluecrop</i>	<i>Elizabeth</i>	<i>Atlantik</i>
АОА (ДФПГ) через 10 мин.	-35,2	Не опр.	<b>+35,4</b>	–
АОА (ДФПГ) через 30 мин.	-28,8	–«–	<b>+29,2</b>	–
Активность КАТ	<b>+5,4</b>	–«–	<b>+7,7</b>	<b>+4,3</b>
Активность ПО	<b>+5,9</b>	–«–	<b>+20,7</b>	+16,4
Активность ПФО	-13,3	–«–	<b>+7,5</b>	-12,7

Примечание. Прочерк (–) означает отсутствие статистически значимых по t-критерию Стьюдента различий при  $p < 0,05$ .

При микроклональном способе размножения растений структура исследуемых корреляционных связей выглядела иначе (табл. 4). В данном случае тесная прямая связь уровня АОА с содержанием гидроксикирочных кислот, выявленная у традиционных растений обоих позднеспелых сортов, сменилась столь же сильной отрицательной связью, свойственной, впрочем, раннеспелому сорту при обоих способах размножения. Наряду с этим у клонированных растений сортов *Weymouth* и *Elizabeth* наблюдалось усиление, по сравнению с растениями *in vivo*, обратной связи между уровнем АОА и содержанием аскорбиновой кислоты на фоне проявления в обоих случаях сильной положительной связи между данными показателями у сорта *Atlantik*. Это сопровождалось существенным усилением роли пектиновых веществ в обеспечении антиоксидантных свойств плодов у первой пары сортов при нарастании их отрицательного влияния на эти свойства у сорта *Atlantik*. Вместе с тем для сортов *Weymouth* и *Elizabeth* было показано проявление, а в ряде случаев и усиление уже существующей отрицательной корреляционной зависимости между уровнем АОА и содержанием в плодах собственно антоцианов и флавонолов и незначительное усиление позитивного влияния на него катехинов и особенно близких им по химической природе лейкоантоцианов [13]. При этом изменение структуры корреляционных связей между уровнем АОА и основными компонентами Р-витаминного комплекса у клонированных растений сорта *Atlantik* носило противоположный установленному у двух предыдущих сортов характер.

Таблица 4

**Коэффициенты парной корреляции ( $R_{x,y}$ ) между содержанием органических соединений в плодах клонированных и традиционных растений сортов *V. corymbosum* L. и уровнем их антиоксидантной и ферментативной активности**

Table 4

**Pair correlation coefficients ( $R_{x,y}$ ) between the organic compounds content and an antioxidant and enzymatic activity level in the fruits of cloned and traditional plants of *V. corymbosum* L. cultivars**

Сорт	Способ размножения	Аскорбиновая кислота	Пектины	Гидроксикирочные кислоты	Антоцианы	Лейко-антоцианы	Катехины	Флавонолы
<b>Антиоксидантная активность</b>								
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	-0,25	0,04	<b>-0,92</b>	0,66	<b>-0,97</b>	0,32	-0,01
	<i>in vitro</i>	<b>-0,79</b>	0,57	<b>-0,83</b>	0,07	0,07	0,35	<b>-0,92</b>
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	0,57	0,08	<b>0,99</b>	-0,59	<b>-0,99</b>	<b>-0,71</b>	0,59
	<i>in vitro</i>	-0,62	<b>0,99</b>	<b>-0,99</b>	<b>-0,70</b>	<b>0,95</b>	0,38	<b>-0,99</b>
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	<b>0,87</b>	-0,03	<b>0,93</b>	<b>-0,80</b>	<b>0,87</b>	-0,66	-0,61
	<i>in vitro</i>	<b>0,94</b>	-0,59	<b>-0,99</b>	<b>0,73</b>	0,53	<b>-0,96</b>	0,59
<b>Активность каталазы</b>								
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	0,55	<b>-0,72</b>	-0,33	<b>1,00</b>	-0,46	-0,50	<b>0,74</b>
	<i>in vitro</i>	<b>-0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>-1,00</b>	-0,50	-0,50	-0,24	<b>-0,98</b>
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	-0,50	<b>-0,87</b>	0,40	<b>-0,98</b>	-0,38	0,33	<b>0,98</b>
	<i>in vitro</i>	-0,48	<b>0,99</b>	<b>-0,99</b>	-0,58	<b>0,88</b>	0,52	<b>-0,99</b>
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	<b>-0,98</b>	-0,28	<b>-0,77</b>	0,58	<b>-0,98</b>	<b>0,86</b>	0,33
	<i>in vitro</i>	<b>0,80</b>	-0,33	<b>-0,95</b>	0,50	<b>0,76</b>	<b>-1,00</b>	0,32
<b>Активность пероксидазы</b>								
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	-0,50	0,67	0,39	<b>-0,99</b>	0,51	0,44	<b>-0,70</b>
	<i>in vitro</i>	<b>0,99</b>	<b>-0,93</b>	<b>1,00</b>	0,50	0,50	0,24	<b>0,98</b>
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	0,52	<b>0,88</b>	-0,38	<b>0,98</b>	0,36	-0,35	<b>-0,98</b>
	<i>in vitro</i>	0,50	<b>-1,00</b>	<b>1,00</b>	0,60	<b>-0,89</b>	-0,50	<b>0,99</b>
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	<b>-0,98</b>	-0,28	<b>-0,77</b>	0,57	<b>-0,98</b>	<b>0,87</b>	0,33
	<i>in vitro</i>	<b>-0,79</b>	0,31	<b>0,94</b>	<b>-0,77</b>	<b>-0,77</b>	<b>0,99</b>	-0,30
<b>Активность полифенолоксидазы</b>								
<i>Weymouth</i>	<i>in vivo</i>	<b>0,98</b>	<b>-0,91</b>	<b>0,76</b>	0,37	0,66	<b>-0,99</b>	<b>0,89</b>
	<i>in vitro</i>	<b>-0,99</b>	<b>0,93</b>	<b>-1,00</b>	-0,50	-0,49	-0,23	<b>-0,98</b>
<i>Elizabeth</i>	<i>in vivo</i>	-0,52	<b>-0,88</b>	0,38	<b>-0,98</b>	-0,35	0,35	<b>0,98</b>
	<i>in vitro</i>	-0,26	<b>-0,70</b>	<b>0,70</b>	-0,15	-0,31	<b>-0,97</b>	0,62
<i>Atlantik</i>	<i>in vivo</i>	<b>0,99</b>	0,43	0,65	-0,43	<b>0,99</b>	<b>-0,94</b>	-0,17
	<i>in vitro</i>	<b>-0,79</b>	0,31	<b>0,94</b>	-0,49	<b>-0,77</b>	<b>0,99</b>	-0,31

Как видим, на фоне выраженной сортоспецифичности структуры корреляционных связей при обоих способах размножения растений у позднеспелых сортов голубики, выращенных *in vivo*, основными источниками антиоксидантной активности являлись аскорбиновая и гидроксикоричные кислоты, у раннеспелого сорта – собственно антоцианы. У клонированных же растений сортов *Weymouth* и *Elizabeth* выявлено отчетливое сходство в усилении относительно традиционных растений роли пектиновых веществ, катехинов и лейкоантоцианов в обеспечении антиоксидантных свойств плодов при ослаблении таковой витамина С и гидроксикоричных кислот, тогда как для сорта *Atlantik* было показано повышение значения в этом плане собственно антоцианов и флавонолов при сохранении приоритетной роли аскорбиновой кислоты и отсутствии влияния на уровень АОА гидроксикоричных кислот.

Исследование структуры корреляционных связей между активностью ферментов окислительно-восстановительного цикла и обозначенными выше компонентами биохимического состава плодов традиционных растений голубики показало наличие у всех модельных сортов положительной связи между активностью каталазы и параметрами накопления флавонолов при наиболее сильном ее проявлении у сортов *Weymouth* и *Elizabeth*. Наряду с этим выявлена прямая связь уровня КАТ с содержанием собственно антоцианов у сортов *Atlantik* и *Weymouth*, катехинов – у позднеспелых сортов и в единичных случаях – с содержанием аскорбиновой кислоты у раннеспелого сорта и гидроксикоричных кислот у сорта *Elizabeth*, что при явной сортоспецифичности силы этой связи позволяло считать данные соединения основными источниками каталазной активности у соответствующих опытных объектов (см. табл. 4). Для остальных органических соединений была установлена отрицательная корреляция с уровнем активности КАТ, наиболее выраженная у позднеспелых сортов.

У меристемных растений голубики выявлены заметные изменения структуры связей между активностью каталазы и содержанием рассматриваемых соединений по сравнению с их традиционными аналогами, в ряде случаев имевшие сходство с показанными выше для уровня АОА. Так, у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* наблюдалось проявление очень сильной прямой связи между активностью данного фермента и содержанием в плодах пектиновых веществ, у позднеспелых сортов – лейкоантоцианов, а также единично – аскорбиновой кислоты (сорт *Atlantik*) и катехинов (сорт *Elizabeth*). При этом, как и в исследованиях антиоксидантной активности, у клонированных растений всех модельных сортов, в отличие от их традиционных аналогов, установлена отрицательная корреляция между активностью каталазы и содержанием гидроксикоричных кислот, у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* – флавонолов, у сорта *Weymouth* – аскорбиновой кислоты и собственно антоцианов, а у сорта *Atlantik* – с содержанием катехинов, что подтверждалось наличием в основном сильных обратных связей с данными показателями.

Это позволяет заключить, что на фоне выраженной сортоспецифичности корреляционных связей между активностью каталазы и содержанием ряда органических соединений в плодах голубики при размножении *in vivo* основными источниками активности данного фермента следовало признать флавонолы, собственно антоцианы и катехины. В изменении структуры связей при микроклональном способе размножения выявлено заметное сходство с установленным для уровня АОА. При этом в обеспечении высокого уровня каталазной активности у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* приоритетное значение обретали пектиновые вещества, у позднеспелых сортов – лейкоантоцианы при преимущественном отрицательном влиянии на него гидроксикоричных кислот и флавонолов, а в единичных случаях также аскорбиновой кислоты и собственно антоцианов (сорт *Weymouth*) и катехинов (сорт *Atlantik*).

На основании исследования структуры корреляционных связей между активностью пероксидазы и содержанием биологически активных соединений в плодах традиционных растений голубики установлено наличие у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* ее средней и сильной положительной связи с содержанием пектиновых веществ и более слабой с таковым лейкоантоцианов (см. табл. 4). Вместе с тем у обоих позднеспелых сортов выявлена средняя и сильная прямая связь между уровнем активности ПО и содержанием собственно антоцианов, причем у сортов *Weymouth* и *Atlantik* подобная связь прослеживалась и с содержанием катехинов при довольно слабом ее проявлении у второго сорта в отношении флавонолов. В остальных же случаях взаимозависимость у исследуемых показателей была отрицательной.

Изменения в структуре корреляционных связей данного фермента при культуральном способе размножения растений в основном имели противоположный с установленным для уровней антиоксидантной и каталазной активности характер. Так, независимо от генотипа опытных растений, здесь наблюдалось чрезвычайно выраженное не ослабление, но проявление тесной положительной связи между активностью ПО и содержанием в плодах гидроксикоричных кислот, а у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* также с содержанием флавонолов при одновременном исчезновении у них характерной для традиционных растений тесной прямой связи с содержанием пектиновых веществ. Наряду с этим, в отличие от традиционных у меристемных растений раннеспелого сорта была показана не отрицательная, как у антиоксидантной и каталазной активности, а средняя и сильная положительная корреляция с содержанием аскорбиновой кислоты и собственно антоцианов на фоне исчезновения прямой связи с последними только у сорта *Atlantik*. При этом

изменения остальных корреляционных связей у меристемных растений относительно их традиционных аналогов были маловыразительными.

Как видим, при отчетливой сортоспецифичности корреляционных связей между активностью пероксидазы и содержанием органических соединений в плодах традиционных растений голубики, основными носителями активности данного фермента являлись пектиновые вещества, собственно антоцианы и лейкоантоцианы. У меристемных растений выявлены преимущественно противоположные по знаку установленным для уровней АОА и активности каталазы изменения в структуре корреляционных связей данного фермента относительно традиционных аналогов. Показано, что приоритетное значение в обеспечении высокого уровня активности ПФО принадлежало гидроксикоричным кислотам и флавонолам, а у сорта *Weymouth* аскорбиновой кислоте и собственно антоцианам при отрицательном влиянии на данный показатель пектиновых веществ.

Анализ структуры корреляционных связей между уровнем активности полифенолоксидазы и содержанием органических соединений в плодах традиционных растений модельных сортов голубики, как и во всех предыдущих случаях, выявил в ней общие закономерности и существенные генотипические различия. Поскольку данная оксидаза является основным ферментом фенольного метаболизма, то для нее следовало ожидать более выраженного, чем у каталазы и пероксидазы, проявления взаимодействия с веществами фенольной природы. Данное предположение подтверждают данные табл. 4, показавшие существование у всех опытных объектов тесной прямой связи активности ПФО с содержанием гидроксикоричных кислот, относящихся к соединениям ряда  $C_6 - C_3$  [14]. У сорта *Weymouth* выявлена умеренная и средняя положительная связь активности фермента с содержанием антоцианов и лейкоантоцианов при наибольшей степени ее проявления с содержанием флавонолов и аскорбиновой кислоты, являющейся общепризнанным стабилизатором фенольных соединений [15]. При этом для содержания катехинов и пектиновых веществ была установлена очень сильная обратная корреляция с активностью ПФО.

В отличие от раннеспелого, у позднеспелых сортов, особенно *Elizabeth*, положительные связи полифенолоксидазной активности с содержанием фенольных соединений проявились заметно слабее, чем у раннеспелого сорта. В частности, у сорта *Elizabeth* при наличии ее весьма умеренной прямой связи с содержанием гидроксикоричных кислот и катехинов тоже обнаружена прямая, но при этом чрезвычайно тесная связь лишь с содержанием флавонолов, тогда как с соединениями антоцианового комплекса, аскорбатом и пектиновыми веществами данное взаимодействие характеризовалось отрицательной направленностью при разной степени выразительности.

В отличие от сорта *Elizabeth*, у традиционных растений сорта *Atlantik* прямые корреляционные связи активности ПФО с содержанием органических соединений проявились намного сильнее. Так, при наличии довольно тесной положительной корреляции с содержанием гидроксикоричных кислот была показана также чрезвычайно сильная прямая взаимосвязь с содержанием в плодах лейкоантоцианов, имевшая, кстати, общий характер с установленной для сорта *Weymouth*. Вместе с тем для остальных групп биофлавоноидов прямых связей с активностью данного фермента выявлено не было. Более того, для содержания катехинов была показана чрезвычайно сильная отрицательная корреляция с активностью ПФО, но при этом была отмечена столь же сильная положительная связь с ней для содержания аскорбиновой кислоты при умеренной связи с содержанием пектиновых веществ.

Изменения в структуре корреляционных связей активности ПФО при культуральном способе размножения растений относительно их традиционных аналогов в значительной степени совпадали с установленными для уровней антиоксидантной и пероксидазной активностей. В частности, было обнаружено более выраженное проявление отрицательной взаимосвязи активности ПФО с содержанием аскорбиновой кислоты, собственно антоцианов, лейкоантоцианов и флавонолов на фоне преимущественного усиления прямых связей с содержанием гидроксикоричных кислот и в единичных случаях с содержанием пектиновых веществ (сорт *Weymouth*) и катехинов (сорт *Atlantik*).

Нетрудно убедиться, что несмотря на показанные генотипические различия в структуре корреляционных связей между активностью ПФО и содержанием органических соединений в плодах традиционных растений голубики, основными ее источниками следовало признать аскорбиновую и гидроксикоричные кислоты, лейкоантоцианы и флавонолы. У клонированных растений в характере изменений структуры корреляционных связей активности ПФО относительно традиционных аналогов выявлено заметное сходство с установленным для уровней АОА и активности ПФО. Показано, что приоритетную роль в обеспечении высокого уровня активности данного фермента здесь играли гидроксикоричные кислоты, а в единичных случаях также пектиновые вещества (сорт *Weymouth*) и катехины (сорт *Atlantik*) при преимущественном отрицательном влиянии на него аскорбиновой кислоты, собственно антоцианов, лейкоантоцианов и флавонолов.

## Заключение

В результате сравнительного исследования в опытной культуре в центральной агроклиматической зоне Беларуси влияния способа вегетативного размножения растений (черенкованием и микроклонального) на антиоксидантный комплекс плодов раннеспелого (*Weymouth*) и позднеспелых (*Elizabeth* и *Atlantik*) сортов *V. corymbosum* L. установлена существенная зависимость от него антиоксидантной и ферментативной активности (каталаза, пероксидаза и полифенолоксидаза), а также структуры их корреляционных связей с содержанием биологически активных соединений. На фоне существенных генотипических различий степени данной зависимости меристемные растения характеризовались на 5–21 % более высокой активностью каталазы и особенно пероксидазы по сравнению с традиционными аналогами, но при этом на 13 % более низкой активностью полифенолоксидазы у сортов *Weymouth* и *Atlantik* и на 8 % более высокой у сорта *Elizabeth*.

При размножении растений *in vivo* для позднеспелых сортов основными источниками антиоксидантной активности являлись аскорбиновая и гидроксикоричные кислоты, у раннеспелого – собственно антоцианы, тогда как в обеспечении антиоксидантных свойств плодов клонированных растений сортов *Weymouth* и *Elizabeth* выявлено усиление относительно традиционных аналогов роли пектиновых веществ, катехинов и лейкоантоцианов при ослаблении таковой витамина С и гидроксикоричных кислот, а для сорта *Atlantik* – повышение значения собственно антоцианов и флавонолов при сохранении приоритетной роли витамина С.

У традиционных растений основными источниками активности каталазы являлись флавонолы, собственно антоцианы и катехины. Показано, что в обеспечении высокого уровня активности данного фермента у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* приоритетное значение принадлежало пектиновым веществам, у позднеспелых сортов – лейкоантоцианам на фоне доминирования отрицательного влияния на него гидроксикоричных кислот и флавонолов. При выраженном сходстве у клонированных растений в характере изменения структуры корреляционных связей активности каталазы с установленным для уровня АОА отмечено, что в обеспечении ее высокого уровня у сортов *Weymouth* и *Elizabeth* приоритетное значение принадлежало пектиновым веществам, у позднеспелых сортов – лейкоантоцианам на фоне доминирования отрицательного влияния на него гидроксикоричных кислот и флавонолов, а в единичных случаях аскорбиновой кислоты и собственно антоцианов (сорт *Weymouth*), а также катехинов (сорт *Atlantik*).

В плодах традиционных растений голубики основными носителями активности пероксидазы являлись пектиновые вещества, собственно антоцианы и лейкоантоцианы, тогда как у их клонированных аналогов выявлены преимущественно противоположные по знаку установленным для уровней АОА и активности каталазы изменения в структуре корреляционных связей. Показано, что приоритетное значение в обеспечении высокого уровня активности данного фермента принадлежало гидроксикоричным кислотам и флавонолам, а у раннеспелого сорта также аскорбиновой кислоте и собственно антоцианам при отрицательном влиянии на него пектиновых веществ.

При размножении растений черенкованием основными носителями полифенолоксидазной активности являлись аскорбиновая и гидроксикоричные кислоты, лейкоантоцианы и флавонолы. У клонированных растений выявлено сходство изменений относительно традиционных аналогов в структуре корреляционных связей данного фермента с установленными для антиоксидантной и пероксидазной активностей. Установлено, что приоритетную роль в обеспечении высокого уровня активности полифенолоксидазы играли гидроксикоричные кислоты, а в единичных случаях также пектиновые вещества (сорт *Weymouth*) и катехины (сорт *Atlantik*) при преимущественном отрицательном влиянии на него аскорбиновой кислоты, собственно антоцианов, лейкоантоцианов и флавонолов.

## Библиографические ссылки

1. Рупасова ЖА, Кутас ЕН, Игнатенко ВА и др. Влияние способов размножения на химический состав листьев растений семейства Брусничные. Сообщение II. Голубика высокая. *Известия Академии аграрных наук Беларуси*. 1998;1:44–49.
2. Рупасова ЖА и др. *Возделывание голубики на торфяных выработках Припятского Полесья (физиолого-биохимические аспекты развития)*. Минск: Беларуская навука; 2016. 242 с.
3. Ehlenfeldt МК, Prior RL. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and phenolic and anthocyanin concentrations in fruit and leaf tissues of highbush blueberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001;49:2222–2227.
4. Рупасова ЖА, Василевская ТИ, Криницкая НБ и др. Влияние способа вегетативного размножения сортов *Vaccinium corymbosum* L. на биохимический состав плодов. *Известия НАН Беларуси. Серия биологических наук*. 2020;65(2):220–228.
5. Мальцева ЕМ и др. Антиоксидантная и антирадикальная активность *in vitro* экстрактов травы *Sanguisorba officinalis* L., собранной в различные фазы развития. *Медицина в Кузбассе*. 2017;16(2):32–38.
6. Nguyen Thi Dung, et al. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx* (Roxb.) Merr and Perry buds. *Food and chemical toxicology*. 2008;46(12):3632–3639.
7. *Физиологические и биохимические методы анализа растений*. Калининград: Калининградский университет; 2000. 59 с.

8. Кинетические, биохимические и биологические методы анализа. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине специализации «Кинетические, биохимические и биологические методы анализа» для студентов специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия». Курган: Курганский государственный университет; 2016. 30 с.
9. Воскресенская ОЛ, Алябышева ЕА, Половникова МГ. *Большой практикум по биоэкологии*. Часть 1. Йошкар-Ола : МарГУ; 2006. 107 с.
10. Макаревич АМ, Решетников ВН. Антиоксидантная активность плодов *Vaccinium corymbosum* L. и *Vaccinium uliginosum* L. Доклады НАН Беларуси. 2011;55(5):76–80.
11. Фенольные соединения и их физиологические свойства. В: *Материалы второго Всесоюзного симпозиума по фенольным соединениям, 17–21 мая 1971 г.* Алма-Ата: [б. н.]; 1973. 238 с.
12. Злобин АА, Мартинсон ЕА, Оводов ЮС. Антиоксидантная и антимикробная активность пектинов ряда растений европейского севера России. *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2011;3(7):33–37.
13. Карабанов ИА. *Флавоноиды в мире растений*. Минск: Ураджай; 1981. 80 с.
14. Вольнец АП. *Фенольные соединения в жизнедеятельности растений*. Минск: Беларуская навука; 2013. 283 с.
15. Медведев СС. *Физиология растений*. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета; 2004. 336 с.

## References

1. Rupasova, ZhA, Kutas EN, Ignatenko VA, et al. *Vliyanie sposobov razmnzheniya na himicheskiy sostav listev rasteniy sem. Brusnichnyie. Soobshch. II. Golubika vyisokaya* [The propagation method influence on the chemical composition of the Lingonberry family plant's leaves. Message II. Highbush blueberry]. *Izvestiya Akademii agrarnykh nauk Belarusi*. 1998;1:44–49. Russian.
2. Rupasova ZhA. *Vozdelyvaniye golubiki na torfyanykh vyrobokakh Pripyatskogo Poles'ya (fiziologo-biokhimicheskiye aspekty razvitiya)* [The cultivation of blueberries on peat mines of Pripyat Polesye (physiological and biochemical aspects of development)]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2016. 242 p. Russian.
3. Ehlenfeldt MK, Prior RL. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and phenolic and anthocyanin concentrations in fruit and leaf tissues of highbush blueberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001;49:2222–2227.
4. Rupasova ZhA, Vasilevskaya TI, Krinitskaya NB, et al. *Vliyanie metoda vegetativnogo razmnzheniya na biokhimicheskiy sostav plodov* [Vegetative propagation method influence on the biochemical composition of *Vaccinium corymbosum* L. cultivar's fruits]. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya biologicheskikh nauk*. 2020;65(2):220–228. Russian.
5. Mal'tseva YeM, et al. *Antioksidantnaya i antiradikal'naya aktivnost' in vitro ekstraktov travy Sanguisorba officinalis L., sobrannoy v razlichnyye fazy razvitiya* [Antioxidant and antiradical activity in vitro of the extracts of the herb *Sanguisorba officinalis* L. collected in various phases of development]. *Meditsina v Kuzbasse*. 2017;16(2):32–38. Russian.
6. Nguyen Thi Dung, et al. Chemical composition, antimicrobial and antioxidant activities of the essential oil and the ethanol extract of *Cleistocalyx* (Roxb.) Merr and Perry buds. *Food and chemical toxicology*. 2008;46(12):3632–3639.
7. *Fiziologicheskie i biokhimicheskie metody analiza rasteniy* [Physiological and biochemical methods of plant analysis]. Kaliningrad; Kaliningradskiy universitet; 2000. 59 p. Russian.
8. *Kineticheskie, biokhimicheskie i biologicheskie metody analiza. Metodicheskie ukazaniya k vyipolneniyu laboratornykh rabot po distsipline spetsializatsii «Kineticheskie, biokhimicheskie i biologicheskie metody analiza» dlya studentov spetsialnosti 04.05.01 «Fundamentalnaya i prikladnaya himiya»* [Kinetic, biochemical and biological methods of analysis. Guidelines for laboratory work in the discipline of specialization «Kinetic, biochemical and biological methods of analysis» for students majoring 04.05.01 «Fundamental and Applied Chemistry»]. Kurgan: Kurganskiy gosudarstvennyy universitet; 2016. 30 p. Russian.
9. Voskresenskaya OL, Alyabyisheva EA, Polovnikova MG. *Bolshoy praktikum po bioekologii. Chast 1* [Big workshop on bioecology. Part 1]. Yoshkar-Ola : MarGU; 2006. 107 p. Russian.
10. Makarevich AM, Reshetnikov VN. *Antioksidantnaya aktivnost plodov Vaccinium corymbosum L. i Vaccinium uliginosum L.* [Antioxidant activity of *Vaccinium corymbosum* L. and *Vaccinium uliginosum* L. fruits]. *Doklady NAN Belarusi*. 2011;55(5):76–80. Russian.
11. *Fenolnyie soedineniya i ih fiziologicheskie svoystva*. In: *Materialy vtorogo Vsesoyuznogo simpoziuma po fenolnyim soedineniyam 17–21 maya 1971 g.* Alma-Ata [Phenolic compounds and their physiological properties: materials of the 2<sup>nd</sup> All-Union Symposium on Phenolic Compounds, 1971 May 17–21, Alma-Ata]. Alma-Ata: [publisher unknown];1973. 238 p. Russian.
12. Zlobin AA, Martinson EA, Ovodov YuS. *Antioksidantnaya i antimikrobnaya aktivnost pektinov ryada rasteniy evropeyskogo severa Rossii* [Antioxidant and antimicrobial activity of pectins of a number of plants in the European North of Russia]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2011;3(7):33–37. Russian.
13. Karabanov IA. *Flavonoidy v mire rasteniy* [Flavonoids in the plant's world]. Minsk: Uradzhay; 1981. 80 p. Russian.
14. Volyinets AP. *Fenolnyie soedineniya v jiznedeyatel'nosti rasteniy* [Phenolic compounds in the plant's life]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2013. 283 p. Russian.
15. Medvedev SS. *Fiziologiya rasteniy* [Plant Physiology]. Saint Petersburg: Izdatelstvo Sankt-Peterburgskogo universiteta; 2004. 336 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 12.12.2020.  
Received by editorial board 12.12.2020.