

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-2-100-105>
УДК: 635.21:631.526.325:581.175.11

И.В. Ким*,
А.Г. Клыков

ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий
Дальнего Востока им. А.К. Чайки»
692539, Россия, Приморский край,
пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30

*Адрес для переписки: kimira-80@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют
об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. И.В. Ким: концептуализация,
разработка методологии исследования, работа
с программным обеспечением; курирование
данных, написание — подготовка черновика
рукописи; визуализация, проведение исследо-
вания; написание-рецензирование и редак-
тирование рукописи. А.Г. Клыков: написание-
рецензирование и редактирование рукописи;
научное руководство исследованием.

Для цитирования: Ким И.В., Клыков А.Г.
Изучение антоцианов в кожуре и мякоти клуб-
ней гибридов картофеля (*Solanum tuberosum*
L.). *Овощи России*. 2024;(2):100-105.
<https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-2-100-105>

Поступила в редакцию: 25.12.2023

Принята к печати: 19.01.2024

Опубликована: 25.03.2024

Irina V. Kim*,
Alexey G. Klykov

Federal State Budget Scientific Institution
“Federal Scientific Center of Agricultural
Biotechnology of the
Far East named after A.K. Chaiki”
30B, Volozhenina st., Timiryazevsky stl.,
Ussuriysk, Primorsky kray, Russia, 692539

*Correspondence: kimira-80@mail.ru

Conflict of interest: The author declare that they
have no conflict of interest.

Authors' Contribution. I.V. Kim: conceptualization,
the development of the research methodology,
work with the software; data curation, writing of the
draft of the manuscript; visualization, the conduct-
ing of the research; the writing-reviewing and edit-
ing of the manuscript. A.G. Klykov: the writing-
reviewing and editing of the manuscript; supervi-
sion.

For citation: Kim I.V., Klykov A.G. Studying antho-
cyanins in the skin and flesh of the tubers of some
potato hybrids (*Solanum tuberosum* L.).
Vegetable crops of Russia. 2024;(2):100-105. (In
Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-2-100-105>

Received: 25.12.2023

Accepted for publication: 19.01.2024

Published: 25.03.2024

Изучение антоцианов в кожуре и мякоти клубней гибридов картофеля (*Solanum tuberosum* L.)



РЕЗЮМЕ

Актуальность. Антоцианы в картофеле привлекают особое внимание в качестве компонентов функционального питания. В настоящее время все больший интерес вызывают исследования об использовании антоцианов для животных и человека, помимо их важной роли в жизни растений. **Цель исследования** – идентифицировать количественный и качественный состав антоцианов в клубнях ценных гибридов картофеля приморской селекции. Объектом исследований служили пять перспективных гибридов картофеля (*Solanum tuberosum* L.) различных групп спелости из конкурсного сортоиспытания ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки». Исследования проводили в 2018-2023 годах в условиях полевого и лабораторного экспериментов Приморского края РФ. Антоцианы разделяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Компоненты идентифицировали методами масс-спектрометрии второго порядка. **Результаты.** Дана оценка гибридов по содержанию антоцианов тканей клубня – кожуры и мякоти. Отмечены сортообразцы с содержанием антоцианов в обеих частях клубня: При-15-12-14 (петунидин-3-арабинозид: 310,0 и 91,1 мг/кг; цианидин-3-глюкозид: 149,8 и 39,8 мг/кг), При-14-52-2 (петунидин-3-арабинозид: 360,0 и 143,0 мг/кг; цианидин-3-глюкозид: 80,4 и 81,2 мг/кг). Выделившиеся образцы имеют окрашенную кожуру: фиолетовую и сине-фиолетовую. Мякоть с фиолетовым пигментом была свойственна генотипам – При-14-52-2 и При-15-12-14. Гибриды При-15-12-14 и При-14-52-2 отличились наибольшим содержанием суммарного количества антоцианов в мякоти – 130,9 и 224,2 мг/кг соответственно. В результате исследований в клубнях, исследуемых образцов выявлено восемь различных антоцианов: дельфинидин-3-глюкозид, дельфинидин-3-рамнозил-5-глюкозид, петунидин-3-глюкозид, мальвидин-3-глюкозид, цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-рамнозил-5-глюкозид, пеларгонидин-3-глюкозид, петунидин-3-арабинозид. Установлено, что для клубней с розовой и красной кожурой характерно наличие пеларгонидин-3-глюкозида. Петунидин-3-глюкозид и цианидин-3-глюкозид обеспечивают фиолетовую окраску кожуры. Выделенная группа сортообразцов рекомендуется для использования в диетическом питании и целенаправленных скрещиваниях селекции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

Картофель (*Solanum tuberosum* L.), антоцианы, гибриды, масс-спектрометрия, ВЭЖХ

Studying anthocyanins in the skin and flesh of the tubers of some potato hybrids (*Solanum tuberosum* L.)

ABSTRACT

Relevance. Today special attention is paid to potato anthocyanins as components of functional food. Increasing interest is generated by research on the use of anthocyanins for the benefit of animals and people in addition to their significant role in the life of plants.

The research goal was to identify the quantitative and qualitative composition of anthocyanins in the tubers of valuable potato hybrids of Primorsky selection. Five promising potato hybrids (*Solanum tuberosum* L.) belonging to different groups of maturity and involved in the comparative variety testing by FSBSI “FSC of Agricultural Biotechnology named after A.K. Chaiki” were used as the research object. The research was carried out under the conditions of field and laboratory experiments in Primorsky kray, Russia, in 2018-2023. The anthocyanins were divided by the method of high-performance liquid chromatography. The anthocyanins were identified by the method of second-order mass spectrometry.

Results. The research evaluated the potato hybrids for the content of anthocyanins in the tissues of the tubers – skin and flesh. The following specimens were determined to have a high content of anthocyanins both in the skin and flesh: Pri-15-12-14 (petunidin-3-arabinoside: 310.0 and 91.1 mg/kg; cyanidin-3-glucoside: 149.8 and 39.8 mg/kg) and Pri-14-52-2 (petunidin-3-arabinoside: 360.0 and 143.0 mg/kg; cyanidin-3-glucoside: 80.4 and 81.2 mg/kg). The selected specimens were characterized by purple and blue-purple skin. Genotypes Pri-14-52-2 and Pri-15-12-14 had tuber flesh with purple pigmentation. Hybrids Pri-15-12-14 and Pri-14-52-2 had the highest total content of anthocyanins in the flesh – 130.9 and 224.2 mg/kg, respectively. The conducted research identified eight different anthocyanins in the tubers of the studied potato specimens: delphinidin-3-glucoside, delphinidin-3-ramnosil-5-glucoside, petunidin-3-glucoside, malvidin-3-glucoside, cyanidin-3-glucoside, cyanidin-3-ramnosil-5-glucoside, pelargonidin-3-glucoside, and petunidin-3-arabinoside. The tubers with pink and red skin were determined to contain pelargonidin-3-glucoside. Petunidin-3-glucoside and cyanidin-3-glucoside colored tuber skin purple. The selected group of specimens might be recommended for use as functional food and in goal-oriented breeding.

KEYWORDS:

Potato (*Solanum tuberosum* L.), anthocyanins, hybrids, mass spectrometry, high-performance liquid chromatography

Введение

Антоцианы в растении относятся к вторичным метаболитам, а конкретно к группе флавоноидов. Они выполняют ряд важных функций, которые можно разделить на две основные группы: отношения растение/насекомое и реакция на воздействие стрессовых факторов окружающей среды [1, 2]. В вегетативных тканях (листьях, стеблях) антоцианины поглощают видимое (сине-зеленое) и ультрафиолетовое излучение (UV-B) и являются мощными антиоксидантами и гасителями свободных радикалов, при этом они защищают фотосинтетический аппарат от воздействия, избыточного видимого или ультрафиолетового излучения и фотооксидативного стресса [3].

Антоцианы синтезируются в кожуре и мякоти клубней картофеля [4]. Известно, что флавоноиды в основном накапливаются в картофельной кожуре, богатой веществами, которые представляют фармакологический интерес [5]. У картофеля как важной продовольственной культуры содержание антоцианов целесообразно повышать в съедобной части растения – мякоти клубней [6]. Пигментированный картофель может служить потенциальным источником природных антоцианов, поскольку имеет невысокую стоимость и является распространенным продуктом питания [7]. Красный и пурпурный картофель содержит ацилированные глюкозиды пеларгонидина, тогда как пурпурный картофель – ацилированные глюкозиды мальвидина, петунидина, пеонидина и дельфинидина [8]. Генотипы картофеля различаются по содержанию биологически активных соединений, в том числе антоцианов. Пигментированные сорта обладают в 1,5-2,5 раза большей фенольной активностью, в 2-3 раза большей антиоксидантной способностью и накапливают больше антоцианов, чем непигментированные генотипы [9]. Известно, что антоцианы обладают капилляроукрепляющими, антиоксидантными, антибактериальными и антиканцерогенными свойствами и применяются в медицине для лечения и профилактики ряда заболеваний (например, сахарного диабета II типа и некоторых форм опухолей) [10]. Полифенолы, содержащиеся в мякоти и кожуре пигментированного картофеля, способствуют снижению уровня оксидативного стресса и воспалительных процессов у людей [11].

Отмечено, что после кулинарной обработки и длительного хранения количество антоцианов практически не изменяется [12, 13]. Перечисленные свойства антоцианов стимулируют вовлечение картофеля в программы селекции на высокое содержание этих пигментов в красной и фиолетовой мякоти и кожуре клубня [14].

В последние годы созданы сорта с высоким содержанием каротиноидов и антоцианов, отличающихся красной и фиолетовой мякотью клубней [15]. В США селекционная работа по созданию специальных диетических сортов ведется с начала 2000 г., в результате получены сорта с высоким содержанием каротиноидов и антоцианов, имеющие красную и фиолетовую мякоть клубней [6]. В России также достигнуты значительные успехи в создании сортов картофеля для диетического питания, проводятся исследования по определению суммарного содержания антиоксидантов в сортообразцах картофеля, выделены сорта, которые имеют наибольший индекс пигментации и содержат в 5 раз больше антиоксидантов, чем беломякотные сорта [16, 17]. Установлена положительная корреляция между содержанием антоцианов и других групп фенольных соединений в тканях клубней картофеля и антиоксидантной активностью [18, 19].

Повышение эффективности селекции по признакам окраски мякоти клубня (красная и фиолетовая) связывают

с разработкой ДНК маркеров целевых генов биосинтеза антоцианов. Известно, что в генетическом контроле биосинтеза антоцианов участвуют гены ферментов халконсинтазы (CHS), халконфлаванонизомеразы (CHI), дигидрофлавонол-4-редуктазы (DFR), флавонон-3-гидроксилазы (F3H), флавоноид-3'-гидроксилазы (F3'H), флавоноид-3',5'-гидроксилазы (F3'5'H) и антоцианидинсинтазы (ANS) [6]. Лocus D (developer, у диплоидного картофеля *S. rybinii* Juz. & Bukasov обозначен как *I – inhibitor*), расположенный в 10-й хромосоме, кодирует транскрипционный фактор (ТФ) R2R3 MYB, обладающий высоким сходством с продуктом ранее выделенного гена петунии гибридной (*Petunia × hybrida hort.*) – *PhAN2*. Представители R2R3 MYB – самая большая группа генов, кодирующих ТФ у растений. Они выполняют важную роль в биосинтезе антоцианов [20].

Изученность генетики антоциановой пигментации клубней и цветков у селекционных форм *S. tuberosum* существенно облегчает подбор родительских пар для скрещивания и планирование объемов селекционного материала при отборе гибридов с окрашенными цветками, стеблями, листьями и клубнями [21].

По данным Симакова Е.А. и др. [22] при измерении антиоксидантной активности (АОА) сортообразцов коллекционного питомника установлен ее высокий уровень (1032–1280 мг/кг) у гибридов с пигментированной окраской кожуры и мякоти клубней, отличающихся высоким содержанием каротиноидов и антоцианов, определяющих ее уровень.

Отбор на высокую питательную ценность по признаку окраски кожуры и мякоти является перспективным направлением. В настоящее время на Дальнем Востоке работы по изучению качественного и количественного состава антоцианов в клубнях картофеля новое направление. В 2018 г. в ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки совместно с ДВФУ (о. Русский) проведена оценка сортов различного происхождения (Россия, Нидерланды, Германия, Казахстан, Украина и Беларусь) выделены источники ценных хозяйственных признаков (повышенная урожайность, красная и фиолетовая окраска кожуры клубня, красно-фиолетовая окраска венчика), которые включены в скрещивания с целью получения диетических сортов [23].

Цель исследований – идентификация количественного и качественного состава антоцианов в клубнях ценных гибридов картофеля приморской селекции.

Материалы и методы исследований

Исходным материалом для исследований послужили пять перспективных гибридов картофеля (*Solanum tuberosum* L.) селекции ФГБНУ «ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки». Сортообразцы характеризовались различными сроками созревания. Исследования проводили в период 2018-2023 годов. На их основе выделены перспективные гибриды с различными показателями антоцианов в клубнях (рис. 1). В качестве стандарта использован районированный сорт Янтарь.

Состав и накопление антоцианов анализировали по методу С.Е. Lewis и др. [24] в Дальневосточном федеральном университете (г. Владивосток, Приморский край). Для определения содержания антоцианов использовали ткани мякоти клубней, кожуры, листьев и соцветий. Собранные образцы хранили до начала анализа (не более 2 нед.) в прохладном месте без доступа прямых солнечных лучей. Образцы промывали в холодной воде, взвешивали, измельчали и заливали раствором, содержащим 40 % этилового спирта и 1% муравьиной кислоты (5 г измельчен-



Рис. 1. Мякоть различных сортов картофеля
Fig. 1. Flesh of different potato varieties

ной массы + 25 мл полученного раствора). Массу подвергали замораживанию-размораживанию, а также ультразвуковой дезинтеграции для разрушения стенок и мембран клеток и органелл. Антоцианы экстрагировали в течение 90 мин при 40°C в закрытом сосуде для предотвращения доступа атмосферного кислорода. Экстракт центрифугировали (СМ-6М, «Elmi», Латвия) при 3500 г в течение 30 мин, супернатант фильтровали через шприцевые фильтры (размер пор 0,45 мкм). Готовый экстракт хранили в морозильной камере при температуре 20°C.

Антоцианы разделяли методом ВЭЖХ на жидкостном хроматографе с градиентным насосом высокого давления LC-20AD и блоком термостатирования колонок СТО-20А («Shimadzu», Япония). Хроматографию проводили на обратнофазной колонке Shodex C18-4E (250½4,6 мм), диаметр зерна сорбента – 5 мкм («Shodex», Япония), температура 50°C, скорость подвижной фазы составляла 0,58 мл/мин. Элюент А – ацетонитрил («AppliChem GmbH», Германия), элюент В – 1% раствор муравьиной кислоты («Sigma-Aldrich», США). Градиент: 0,00-5,00 мин – концентрация В изменялась от 100 до 92%; 5,00-45,00 мин – концентрация В изменялась от 92 до 80%; 45,00-45,01 мин – концентрация В изменялась от 80 до 10%. Детектирование проводили в диапазоне длин волн 300-600 нм UV/VIS спектрофотометрическим детектором SPD-20А («Shimadzu», Япония). Для анализа вводили по 5 мкл экстракта. Анализ проводили в 84 биологических и 3 аналитических повторностях. Для гибридов с фиолетовым и сине-фиолетовым пигментом содержание антоцианов пересчитывали по мальвидин-3-глюкозиду, используя коэффициент поглощения $3,02 \cdot 10^4$ в диапазоне длин волн 300-600 нм и молекулярную массу 493,3 г/моль, для остальных образцов – по пеларгонидин-3-глюкозиду с молярным коэффициентом экстинкции $2,73 \cdot 10^4$ при диапазоне длин волн 300-600 нм и молекулярной массой 433,3 г/моль.

Антоцианы идентифицировали методами масс-спектрометрии второго порядка с помощью ловушки amaZon SL («Bruker», Германия), оснащенной источником ионизации электрораспылением. Для этого выделенные ранее методом ВЭЖХ антоцианины анализировали методом прямого ввода. Детектирование проводили в режиме положительных и отрицательных ионов. Диапазон сканирования масс – от 150 до 2200 а.е.м., максимальная скорость сканирования 32000 Да/с, напряжение на распыляющем капилляре 4500 В, давление на небулайзере 29 psi, поток сухого газа 10 л/с, температура капилляра 180°C. Фрагментацию ионов проводили электронным пучком с энергией 1,5 эВ. Анализ проводили в 15 биологических и 3 аналитических повторностях.

Для проверки достоверности полученных результатов использовали статистические программы MS Excel 2007 и

Statistica 8 («StatSoft, Inc.», США), рассчитывали средние (M) и $t_{0,05} \cdot \frac{1}{2} SEM$.

Результаты исследований и их обсуждение

На первоначальном этапе эксперимента нами исследованы неочищенные клубни (изучался состав антоцианов в кожуре и мякоти в совокупности). У сортов с розовой и темно-розовой окраской клубня выявлено преобладающее присутствие пеларгонидин-3-глюкозида, гибриды с фиолетовой и сине-фиолетовой окраской содержали преимущественно петунидин-3-глюкозид и цианидин-3-глюкозид (табл. 1).

В образцах с желтой окраской кожуры антоциановые вещества детектировали в незначительном количестве. В клубнях стандарта Янтарь детектирован петунидин-3-глюкозид – 1,8 мг/кг.

По суммарному количеству антоцианов в клубнях выделялась группа генотипов с фиолетовой и сине-фиолетовой кожурой – 137,7 и 223,3 мг/кг. Сортообразцы с розовым пигментом на клубнях характеризовались количеством антоциановых компонентов в среднем от 2,5 до 70,3 мг/кг.

Наибольшее содержание антоцианов характерно для сортообразцов с розовой кожурой: При-15-7-16 (87,4 мг/кг), При-15-41-8 (85,1); фиолетовой кожурой – При-15-12-14 (137,7), При-14-52-2 (223,3 мг/кг). Выявлен генотип с многокомпонентным составом – 4 антоциана в совокупности: При-15-12-14 (петунидин-3-глюкозид, цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-рамнозил-5-глюкозид, дельфинидин-3-рамнозил-5-глюкозид).

Мякоть клубней картофеля – кладезь углеводов, витаминов и антиоксидантов. Это основная часть растения, которая употребляется в пищу. В настоящее время разнообразие окраски мякоти варьирует от белой до фиолетовой. Сортообразцы с цветной мякотью обладают особой ценностью, так как считаются источниками антиоксидантов, в том числе антоцианов. В Государственном реестре селекционных достижений РФ за 2022 г. включено всего два сорта с пигментированной мякотью: Сюрприз (розовая мякоть) и Фиолетовый (фиолетовая мякоть), из них ни один не допущен для выращивания в Дальневосточной зоне. В связи с этим в 2019 г. детекцию антоцианового профиля клубней провели в двух частях, разделив кожуру и мякоть. При сравнении количественного и качественного состава антоцианов в кожуре и мякоти клубней были получены результаты, свидетельствующие о том, что максимальное содержание компонентов находится в кожуре и ближе к ней.

При исследовании сортообразцов с розовой и красной окраской клубня выявлено преобладающее присутствие пеларгонидина и дельфинидина. Редко встречающимся антоцианом отмечен мальвидин (табл. 2).

Генотипы выделенной группы существенно превышали

Таблица 1. Содержание антоцианов в клубнях у изученных гибридов картофеля в зависимости от окраски кожуры
Table 1. Content of anthocyanins in the tubers of the studied potato hybrids in relation to their skin color

Сорт, гибрид	Антоциан	Молекулярный ион [M+H] ⁺	Время выхода на ВЭЖХ, мин.	Содержание антоцианов, мг/кг
Желтая и кремовая окраска кожуры клубня				
Янтарь, st	Pt3Glu	479,3; 317,2	35,0	1,8±0,1
Желтая окраска кожуры клубня с розовыми пятнами, розовая и красная окраска				
При-15-7-16 Ирбитский × Аврора	Dp3Glu	465,3; 303,2	25,0	14,6±0,1
	Pl3Glu	433,3; 271,1	37,5	70,3±0,3
	Mv3Glu	493,3; 331,3	44,0	2,5±0,1
При-15-41-8 Русская красавица × Ирбитский	Pl3Glu	433,3; 271,1	37,5	63,2±0,3
	Mv3Glu	493,3; 331,3	44,0	9,6±0,1
	Dp3Glu	465,3; 303,2	25,0	12,3±0,1
При-12-35-4 Дебрянск × Мустанг	Dp3Glu	465,3; 303,2	25,0	2,9±0,1
	Pl3Glu	433,3; 271,1	37,5	59,1±0,3
Фиолетовая и сине-фиолетовая окраска кожуры клубня				
При-15-12-14 Purple potato × Манifest	Pt3Glu	479,3; 317,2	35,0	125,0±0,3
	Cy3Glu	449,2; 287,2	27,5	1,2±0,1
	Cy3Ram5Glu	611,3; 499,3; 287,2	19,0	3,6±0,1
	Dp3Ram5Glu	627,3; 465,3; 303,2	17,5	7,9±0,1
При-14-52-2 Ломоносовский × Purple potato	Pt3Glu	479,3; 317,2	35,0	124,1±0,3
	Cy3Glu	449,2; 287,2	27,5	85,6±0,2
	Pl3Glu	433,3; 271,1	37,5	13,6±0,1

Примечание. Pt3Glu – петунидин-3-глюкозид; Mv3Glu – мальвидин-3-глюкозид; Pl3Glu – пеларгонидин-3-глюкозид; Dp3Ram5Glu – дельфинидин-3-рамнозил-5-глюкозид; Dp3Glu – дельфинидин-3-глюкозид; Cy3Ram5Glu – цианидин-3-рамнозил-5-глюкозид; Cy3Glu – цианидин-3-глюкозид; Pt3Ara – петунидин-3-арабинозид

контрольный сорт Янтарь по количественному содержанию антоцианов. Наибольшее содержание антоцианов характерно для сортообразцов с розовой кожурой – При-15-7-16 (87,4 мг/кг), При-15-41-8 (85,1 мг/кг). Сортообразцы с кожурой клубня розовых и красных оттенков характеризовались повышенным содержанием анто-

цианов в среднем 73,8 мг/кг в кожуре и незначительным количеством веществ в мякоти – 1,5 мг/кг. Отмечен высокий коэффициент вариации – 15,7-39,7%.

Сорта с фиолетовой и сине-фиолетовой окраской содержали преимущественно петунидин-3-глюкозид и цианидин-3-глюкозид. Наибольшее количество антоциа-

Таблица 2. Содержание антоцианов в кожуре и мякоти клубней у гибридов картофеля
Table 2. Content of anthocyanins in the skin and flesh of the tubers of the studied potato hybrids

Сорт/гибрид	Антоциан	Происхождение	Содержание антоцианов, мг/кг		
			клубень	кожура	мякоть
Янтарь, st	Pt3Glu	Россия	1,8±0,1	1,2±0,1	< 0,5
При-15-7-16 Ирбитский × Аврора	Dp3Glu	Россия	14,6±0,1	2,0±0,1	< 0,5
	Pl3Glu		70,3±0,3	204,1±0,3	< 0,5
	Mv3Glu		2,5±0,1	10,8±0,1	< 0,5
	Pt3Ara		-	40,1±0,2	1,4±0,1
	Cy3Glu		-	99,1±0,2	2,3±0,1
При-15-41-8 Русская красавица × Ирбитский	Pl3Glu	Россия	63,2±0,3	130,1±0,4	< 0,5
	Mv3Glu		9,6±0,1	5,2±0,1	< 0,5
	Dp3Glu		12,3±0,1	15,0±0,1	< 0,5
	Pt3Ara		-	16,7±0,1	< 0,5
	Cy3Glu		-	4,5±0,1	< 0,5
При-12-35-4 Дебрянск × Мустанг	Dp3Glu	Россия	2,9±0,1	3,5±0,1	1,2±0,1
	Pl3Glu		59,1±0,3	110,1±0,2	< 0,5
	Pt3Ara		-	7,8±0,1	< 0,5
При-15-12-14 Purple potato × Манifest	Pl3Glu	Россия	125,0±0,3	114,0±0,3	12,6±0,2
	Pt3Ara		-	350,0±0,5	91,1±0,3
	Cy3Glu		140,2±0,4	39,8±0,2	1,2±0,1
	Cy3Ram5Glu		-	-	3,6±0,1
	Dp3Ram5Glu		-	-	7,9±0,1
	Dp3Glu		-	63,1±0,1	1,7±0,1
	Pl3Glu		-	5,0±0,1	< 0,5
Mv3Glu	-	10,0±0,1	1,0±0,1		
При-14-52-2 Ломоносовский × Purple potato	Pt3Glu	Россия	124,1±0,3	-	-
	Pt3Ara		-	357,9±0,5	143,0±0,4
	Cy3Glu		85,6±0,2	80,4±0,1	81,2±0,3
	Pl3Glu		13,6±0,1	84,1±0,2	1,2±0,1
	Dp3Glu		-	10,1±0,1	1,5±0,1
Mv3Glu	-	2,1±0,1	1,1±0,1		

Знак «-» - антоцианы не обнаружены

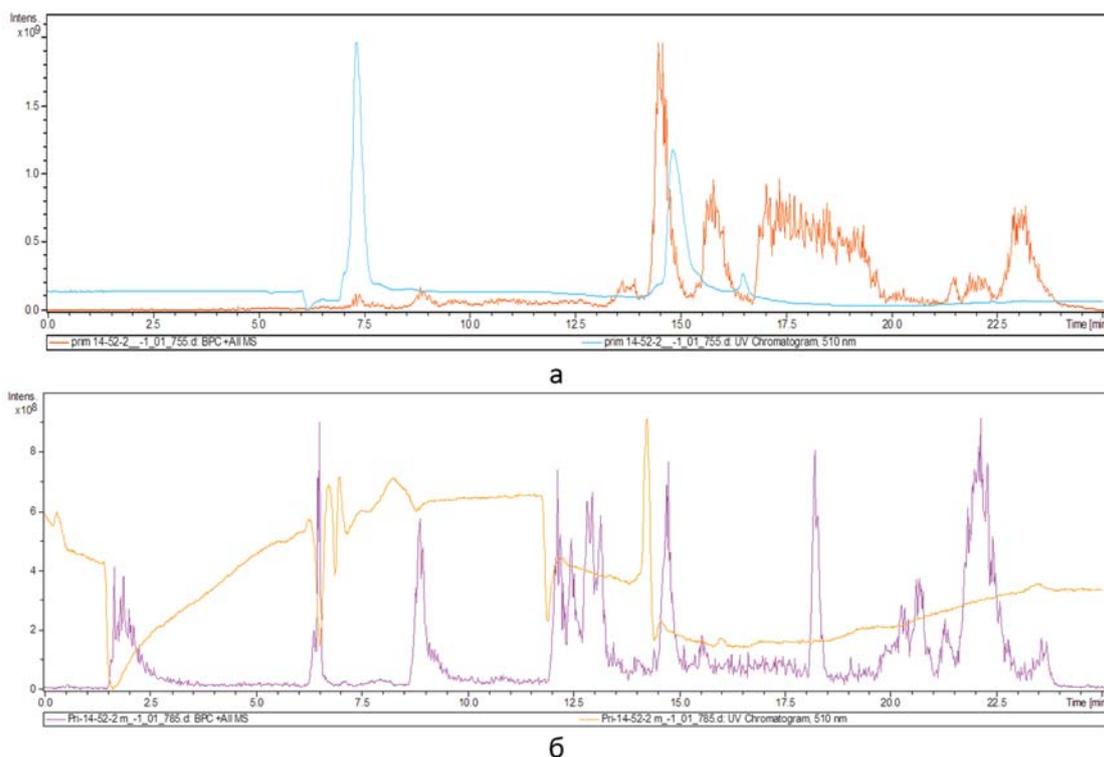


Рис. 2. Профиль элюции антоцианов, выделенных из кожуры (а) и мякоти (б) клубней картофеля гибрида При-14-52-2
Fig. 2. Elution profile of the anthocyanins isolated from the skin (a) and flesh (b) of the tubers of potato variety Pri-14-52-2

нов отмечено у сортообразцов с фиолетовой кожурой – При-15-12-14 (137,7 мг/кг), При-14-52-2 (223,3 мг/кг).

Мякоть клубней фиолетового цвета обладает высоким содержанием антоцианов, на уровне состава кожуры. Генотипы с фиолетовыми клубнями отличились содержанием антоциановых компонентов в обеих частях клубня и в среднем их количество составило: в кожуре – 334,9 мг/кг и мякоти – 80,3 мг/кг.

Выявлен генотип с многокомпонентным составом – 8 антоцианов: При-15-12-14.

Ранее проведенные исследования подтверждают, что качественный состав антоцианов, как правило, специфичен и зависит от сортовых особенностей и условий произрастания растений, которыми определяется активность соответствующих ферментов, способствующих синтезу определенных компонентов антоцианового комплекса [7]. Сорта с фиолетовой и розовой кожурой разных оттенков выделались по содержанию антоцианов в клубнях по сравнению с сортообразцами с желтыми клубнями. Следовательно, окраска кожуры клубня (розовая, темно-розовая, сине-фиолетовая, фиолетовая) может использоваться в качестве визуального признака в селекции при создании диетических сортов с повышенным содержанием антоцианов. Исследованиями установлена связь розовой и темно-розовой окраски кожуры с повышенным содержанием пеларгонидин-3-глюкозида, в пределах 63-95 мг/кг. В результате изучения получен патент на изобретение «Способ отбора сортообразцов картофеля с повышенным содержанием антоцианов» (№2723406, получен 11.06.2020 г. с датой приоритета 09.12.2019 г.).

В клубнях гибрида При-14-52-2 петунидин-3-арабинозид является основным компонентом, и в больших количествах обнаружен в кожуре и мякоти образца (рис. 2).

Во время фиксации детекции обнаружен интенсивный сигнал при длине волны 510 нм (время удерживания 15,5 мин), что соответствует основному антоциану – петунидин-3-арабинозиду гибрида При-14-52-2, кроме того, присутствовал в значительных количествах пеларгонидин-3-глюкозид (пик при 14,9 мин). При анализе мякоти гибрида При-14-52-2 зафиксирован пик с интенсивным сигналом на

14,3 мин., что соответствует петунидин-3-арабинозиду. Также отмечен сигнал на 10,5 мин. – где был идентифицирован цианидин-3-глюкозид. Профили элюции выявили связь между содержанием конкретных антоцианов и окраской клубней, а также их принадлежностью к определенному сортообразцу.

В результате проведенного анализа компонентного состава клубня тканей кожуры и мякоти отмечены сортообразцы с содержанием антоцианов в обеих частях клубня: При-15-12-14 (петунидин-3-арабинозид: 310,0 и 91,1 мг/кг; цианидин-3-глюкозид: 149,8 и 39,8 мг/кг), При-14-52-2 (петунидин-3-арабинозид: 360,0 и 143,0 мг/кг; цианидин-3-глюкозид: 80,4 и 81,2 мг/кг). Выделившиеся образцы имеют окрашенную кожуру: фиолетовую и сине-фиолетовую. Мякоть с фиолетовым пигментом была свойственна генотипам – При-14-52-2 и При-15-12-14. Гибриды При-15-12-14 и При-14-52-2 отличились наибольшим содержанием суммарного количества антоцианов в мякоти – 130,9 и 224,2 мг/кг соответственно.

Заключение

В результате исследований в клубнях выявлено восемь различных антоцианов. После проведения масс-спектрометрии второго порядка, выделенные антоцианы идентифицированы как дельфинидин-3-глюкозид, дельфинидин-3-рамнозил-5-глюкозид, петунидин-3-глюкозид, мальвидин-3-глюкозид, цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-рамнозил-5-глюкозид, пеларгонидин-3-глюкозид, петунидин-3-арабинозид. Установлено, что для клубней с розовой и красной кожурой характерно наличие пеларгонидин-3-глюкозида. Петунидин-3-глюкозид и цианидин-3-глюкозид обеспечивают фиолетовую окраску кожуры. Детекция антоцианового профиля в кожуре и мякоти клубня картофеля позволила выделить генотипы, являющиеся источниками повышенного содержания антоцианов: При-15-12-14 Purple potato Ч Манифест, При-14-52-2 Ломоносовский Ч Purple potato, которые находятся в питомниках конкурсного сортоиспытания. Выделенная группа сортообразцов рекомендуется для использования в диетическом питании и целенаправленном селекционном процессе.

• Литература

- Quina F.H., Moreira J.P.F., Vautier-Giongo C., Rettori D., Rodrigues R., A. Freitas et al. Photochemistry of anthocyanins and their biological role in plant tissues. *Pure Appl. Chem.* 2009;81(9):1687-1694. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-08-09-28>.
- Onslow M.W. The anthocyanin pigments of plants. Second ed. Cambridge: University Press; 2014.
- Mierziak J., Kostyn K., Kulma A. Flavonoids as important molecules of plant interactions with the environment. *Molecules.* 2014;19(10):16240-16265. <https://doi.org/10.3390/molecules191016240>.
- Kalita D., Jayanty S.S. Comparison of polyphenol content and antioxidant capacity of colored potato tubers, pomegranate and blueberries. *J. Food Proc. Technol.* 2014;(5):358. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000358>.
- Schieber A., Saldana M.A. Potato peels: a source of nutritionally and pharmacologically interesting compounds – a review. *Food.* 2009;3(2):23-29. <https://doi.org/10.7939/R33T9DM0H>.
- Zhang Y., Jung C.S., De Jong W.S. Genetic analysis of pigmented tuber flesh in potato. *Theor. Appl. Genet.* 2009;119(1):143-150. <https://doi.org/10.1007/s00122-009-1024-3>.
- Поливанова О.Б., Гинс Е.М. Антиоксидантная активность пигментированного картофеля (*Solanum tuberosum* L.), содержание антоцианов, их биосинтез и физиологическая роль. *Овощи России.* 2019;(6):84-90. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-6-84-90>. EDN ITVJJO.
- Eichhorn S., Winterhalter P. Anthocyanins from pigmented potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties. *Food Res. Int.* 2005;38(8/9):943-948. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.03.011>.
- Козлова Л.Н., Пискун Г.И., Корзан А.А., Незаконова О.Б., Рядинская Е.А. Взаимосвязь между суммарной антиоксидантной способностью и морфологическими характеристиками клубней картофеля. *Картофелеводство.* 2020;27(2):37-41. EDN LNBJEK.
- Choi M.K., Park S.J., Eom S.H., Kang M.H. Anti-diabetic and hypolipidemic effects of purple-fleshed potato in streptozotocin-induced diabetic rats. *Food Sci. Biotechnol.* 2013; 22: 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10068-013-0231-5>.
- Kaspar K.L., Park J.S., Brown C.R., Mathison B.D., Navarre D.A., Chew B.P. Pigmented potato consumption alters oxidative stress and inflammatory damage in men. *J. Nutr.* 2011;141:108-111. <https://doi.org/10.3945/jn.110.128074>.
- Lemos M.A., Aliyu M.M., Hungerford G. Influence of cooking on the levels of bioactive compounds in Purple Majesty potato observed via chemical and spectroscopic means. *Food Chem.* 2015;173:462-467. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.064>.
- Bellumori M., Innocenti M., Michelozzi M., Cerretani L., Mulinacci N. Coloured-fleshed potatoes after boiling: Promising sources of known antioxidant compounds. *J. Food Composit. Anal.* 2017;59:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.02.004>.
- Bellumori M., Nancy A., Silva Ch., Vilca L., Andrenelli L., Cecchi L. et al. A Study on the Biodiversity of Pigmented Andean Potatoes: Nutritional Profile and Phenolic Composition. *Molecules.* 2020;25(3169):1-17. doi.org/10.3390/molecules25143169.
- Ezekiel R., Singh N., Sharma S., Kaur A. Beneficial phytochemicals in potato – a review. *Food Res. Int.* 2013;50:487-496. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.025>.
- Мелешина О.В., Мелешин А.А. Создание картофеля с повышенной антиоксидантной активностью – перспективное направление в селекции современных сортов. В кн.: *Материалы научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития селекции и семеноводства картофеля».* М. 2018. С. 129-139. EDN XSIMQP.
- Гинс Е.М., Москалев Е.А., Поливанова О.Б., Митюшкин А.В., Симаков Е.А. Оценка содержания веществ с антиоксидантной активностью в образцах картофеля коллекции исходных родительских форм Федерального исследовательского центра картофеля имени А.Г. Лорха.

Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2020;15(3):242-252. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2020-15-3-242-252>. EDN IHYMLA.

- Tian J., Chen J., Ye X., Chen S. Health benefits of the potato affected by domestic cooking: a review. *Food Chem.* 2016;202:165-175. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.120>.
- Стрыгина К.В., Хлесткина Е.К. Синтез антоцианов у картофеля (*Solanum tuberosum* L.): генетические маркеры для направленного отбора. *Сельскохозяйственная биология.* 2017;52(1):37-49. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2017.1.37rus>. EDN YFQFCR.
- Feller A., Machemer K., Braun E.L., Grotewold E. Evolutionary and comparative analysis of MYB and bHLH plant transcription factors. *Plant J.* 2011;66(1) 94-116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2010.04459.x>.
- Andre C.M., Ourfir M., Guignard C., Hoffman L., Hausman J.F., Evers D. et al. Antioxidant profiling of native Andean potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) reveals cultivars with high levels of beta-carotene, alpha-tocopherol, chlorogenic acid, and petanin. *J. Agric. Food Chem.* 2007;55(26):10839-10849. <https://doi.org/10.1021/jf0726583>.
- Симаков Е.А., Митюшкин А.В., Журавлев А.А., Митюшкин Ал-др В., Гайзатулин А.С. Сравнительная оценка исходного материала картофеля в селекции на повышение питательной ценности клубней. *Картофелеводство.* 2020;27(2):30-36.
- Kim I.V., Klykov A.G. Перспективы развития картофелеводства на Дальнем Востоке. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук.* 2018;3(199):12-15. EDN VPWXQW.
- Lewis C.E., Walker J.R.L., Lancaster J.E., Sutton K.H. Determination of anthocyanins, flavonoids and phenolic acids in coloured potatoes. I: Coloured cultivars of *Solanum tuberosum* L. *J. Sci. Food Agric.* 1998;77(1):45-57. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199805\)77:1<45::AID-JSFA1>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199805)77:1<45::AID-JSFA1>3.0.CO;2-S)

• References

- Polivanova O.B., Gins E.M. Antioxidant activity of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) and anthocyanin content, its biosynthesis and physiological role. *Vegetable crops of Russia.* 2019;(6):84-90. (In Russ.) <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2019-6-84-90>. EDN ITVJJO.
- Kozlova L.N., Piskun G.I., Korzan A.A., Nezakonova O.B., Ryadinskaya E.A. Relationship between total antioxidant capacity and morphological characteristics of potatoes tubers. *Potato Growing.* 2020;27(2):37-41. (In Russ.) EDN LNBJEK.
- Meleshina O.V., Meleshin A.A. Creating potato with high antioxidant activity – promising direction in the breeding of modern varieties. In: *Proceedings of the Scientific Conference “Modern state and prospects of the breeding and seed production of potato”.* Moscow, 2018. P. 129-139. (in Russ.)
- Gins E.M., Moskaev E.A., Polivanova O.B., Mityushkin A.V., Simakov E.A. Antioxidant contents in potato cultivars from the collection of Russian Potato Research Center. *RUDN journal of agronomy and animal industries.* 2020;15(3):242-252. <https://doi.org/10.22363/2312-797X-2020-15-3-242-252>. (In Russ.) EDN IHYMLA.
- Strygina K.V., Khlestkina E.K. Anthocyanins synthesis in potato (*Solanum tuberosum* L.): genetic markers for smart breeding. *Agricultural Biology.* 2017;52(1):37-49. doi: 10.15389/agrobiol.2017.1.37rus. (In Russ.) EDN YFQFCR.
- Simakov E.A., Mityushkin A.V., Zhuravlev A.A., Mityushkin A.V., Gayzatulin A.S. Comparative evaluation of potatoes basic material in breeding to increase tubers nutrient quality. *Potato Growing.* 2020;27(2):30-36. (In Russ.)
- Kim I.V., Klykov A.G. The development prospects of the potato breeding in the Far East. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.* 2018;3(199):12-15. (In Russ.) EDN VPWXQW.

Об авторах:

Ирина Вячеславовна Ким – доктор с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории диагностики болезней картофеля, автор для переписки, kimira-80@mail.ru, SPIN-код: 4991-4382, <https://orcid.org/0000-0002-0656-0645>

Алексей Григорьевич Клыков – доктор биол. наук, академик РАН, заведующий отделом селекции и биотехнологии сельскохозяйственных культур, SPIN-код: 2857-8546, <https://orcid.org/0000-0002-2390-3486>

About the Authors:

Irina V. Kim – Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Laboratory for Diagnostics of Potato Diseases, Correspondence Author, kimira-80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0656-0645>

Alexey G. Klykov – Dr. Sci. (Biology), Academician of RAS, Head of the Department of the Breeding and Biotechnology of Agricultural Crops, <https://orcid.org/0000-0002-2390-3486>