

ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ НАКОПЛЕНИЯ БЕТАНИНА У ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ СТОЛОВОЙ СВЕКЛЫ КОЛЛЕКЦИИ ВИР

DOI: 10.30901/2227-8834-2019-4-66-74

УДК 631.52:635.112

Поступление/Received: 16.09.2019

Принято/Accepted: 29.11.2019

Д. В. СОКОЛОВА

Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов
растений имени Н.И. Вавилова (ВИР),
190000 Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44;
✉ dianasokol@bk.ru

ENVIRONMENTAL AND GEOGRAPHIC STUDY OF
BETANIN ACCUMULATION IN PROMISING RED BEET
ACCESSIONS FROM THE VIR COLLECTION

D. V. SOKOLOVA

N.I. Vavilov All-Russian Institute
of Plant Genetic Resources (VIR),
42, 44 Bolshaya Morskaya Street,
St. Petersburg 190000, Russia;
✉ dianasokol@bk.ru

Актуальность. Столовая свекла – источник натурального красителя бетанина (пищевая добавка E-162). Нехватка отечественного сырья с высоким содержанием пигмента – причина массовых поставок этого красителя из-за рубежа. Коллекция ВИР является базовой основой для селекции сортов с высоким содержанием бетанина. **Материал и методы.** В исследовании участвовала группа из 29 образцов. Спектрофотометрический анализ содержания пигмента выполнен в лаборатории компании АО «ЭКО РЕСУРС». Оценку устойчивости образцов к церкоспорозу и вредителям проводили по 5-бальной шкале. Полевые опыты выполнены по единой методике в течение 2015–2017 гг. на научно-производственной базе «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», на Волгоградской опытной станции – филиале ВИР, и Майкопской опытной станции – филиале ВИР. **Результаты.** Выявлена неодинаковая способность к накоплению бетанина образцами и различия в его концентрации. Описаны морфологические особенности строения фотосинтетического аппарата и корнеплода, отмечены взаимосвязи с изучаемым признаком. Показано, что накопление бетанина у столовой свеклы сопряжено с агроклиматическими условиями выращивания и генотипом образца. **Заключение.** Процесс накопления пигмента крайне чувствителен к погодным условиям, водному балансу почвенного раствора и равномерности поступления влаги: негативное воздействие этих факторов нивелирует сортовые различия культуры. Поражение болезнями и вредителями способствовало замедлению и остановке аккумуляции бетанина. Рекомендованы сорта столовой свеклы для выращивания с целью выделения бетанина в условиях Ленинградской области.

Ключевые слова: *Beta vulgaris* L., беталаины, натуральный пищевой краситель; пигменты; агроэкологическое изучение.

Background. Table beet (*Beta vulgaris* L.) is a source of 'betanin', a natural food dye known as food additive E-162. The VIR collection holds a large diversity of red beet accessions. It is the base for obtaining source material to breed cultivars with high betanin content. **Materials and methods.** In the framework of this study, which lasted from 2015 to 2018, a group of 29 accessions identified during the screening was analyzed. The pigment was assessed at the laboratory of the ECO RESOURCE Joint-Stock Company using Spectrophotometer SF-2000. Field experiments were performed according to VIR's guidelines in 2015–2017 at Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, Volgograd Experiment Station of VIR, and Mai-kop Experiment Station of VIR. **Results.** Environmental and geographic tests demonstrated that the ability to accumulate the pigment was variable among the red beet accessions, and its concentrations were notably different. The research showed that accumulation of betanin is primarily associated with agroclimatic growing conditions. The dynamics of pigment accumulation can be both positive and negative. The optimal zone for growing the studied accession is Leningrad Province, where the highest content of betanin was observed. Mid-ripening and cold-resistant old landraces were a reference point in the search for the desired genotypes. **Conclusion.** The process of pigment accumulation is extremely responsive to weather conditions, soil water balance, and watering uniformity. The negative impact of these factors would smooth down the crop's varietal polymorphism. Diseases and insect pests have led to slowing and stopping the accumulation of betanin. As a result of the comprehensive agroecological study of prototypes, promising accessions were identified and recommended for cultivation in Leningrad Province with the aim of betanin production.

Key words: *Beta vulgaris* L., betalains, natural food dye, pigments, agroecological study.

Введение

Изготовление качественного и безопасного продукта – основная задача пищевой отрасли РФ. Тенденция современного производства – получение экологически безопасного продукта, сырья, которое не только не навредит здоровью человека, но и будет обладать биологической активностью, способствовать оздоровлению.

В настоящее время ни одно производство пищевых продуктов не обходится без применения добавок различного функционального назначения: усилителей

вкуса и аромата, ароматизаторов, антиокислителей, консервантов, эмульгаторов, стабилизаторов, загустителей, регуляторов антибиотиков, красителей (Shachek et al., 2017). Применение красителей вызвано требованиями потребителей. Красители позволяют восстановить или повысить интенсивность окраски готового продукта, которая снижается в результате воздействия на исходные сырьевые компоненты различных технологических факторов, таких как температура, влага и др. Для придания различных оттенков продуктам производители используют как натуральные (природного происхождения), так

и синтетические (органической и неорганической природы) красители.

Одним из источников натуральных пищевых красителей является столовая свекла – ценная овощная культура, характеризующаяся высокой продуктивностью, скороспелостью, длительной сохранностью корнеплодов, а также содержанием биологически активных веществ (Azerego, 2009), витаминов, минеральных элементов, ценного красящего пигмента бетанина и азотистого вещества бетанина, обладающих целебными свойствами (Burenin et al., 2016; Gins et al., 2016). Окраска корнеплодов свеклы определяется наличием беталаиновых пигментов, которые подразделяются на две группы: бетацианины и бетаксантины. Бетацианины отвечают за красно-фиолетовую и пурпурную окраску, бетаксантины – за желтую. Основным классом пигментов столовой свеклы являются бетацианины, а бетаксантины составляют, как правило, лишь несколько процентов от общего количества. Экстракт столовой свеклы, содержащий беталаины, представляет собой розовые или фиолетовые пигменты. Они известны в качестве пищевой добавки по коду E-162 (бетанин) в Европейском союзе и 73.40 (свекольный порошок) Управления по продовольствию и медикаментами (FDA). E-162 в основном применяется для окраски фруктовых йогуртов, мороженого, джемов, жевательных резинок, соусов и супов. Тот же пигмент используется в косметических и фармацевтических препаратах. Бетанин разрушается под воздействием света, тепла и кислорода. Поэтому он используется в замороженных и высушенных продуктах, а также в продуктах с небольшим сроком хранения.

Впервые красно-фиолетовый пигмент выделили из свеклы немецкие химики Шудель и Вильштеттер, которые и назвали его бетанином (Willstatter, 1932). Структуру этого пигмента установили лишь в 1962 году (Mabry et al., 1962; Mabry, Dreiding, 1968). Это первое соединение, относящееся к классу бетацианинов, которое было подробно изучено. Бетанин представляет собой гликозид: агликоном его является бетанидин, сахарной частью – глюкоза (рис. 1). Спектральный анализ, используемый для определения содержания бетанина, показывает максимум поглощения в видимой области спектра при длине волны нанометра (нм), что является характеристической длиной волны для бетацианиновых пигментов (Sleptsov et al., 2015). У бетаксантинов этот показатель от 474 до 486 нм (Piattelli, Minale, 1964).

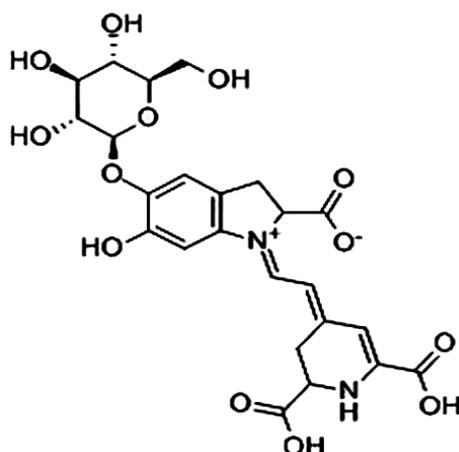


Рис. 1. Структурная формула бетанина (C₂₄H₂₆N₂O₁₃)

Fig. 1. The structural formula of betanin (C₂₄H₂₆N₂O₁₃)

Изучение наследования окраски у разновидностей культурной свеклы было начато в начале прошлого века Б. Каянусом (Kajanus, 1917). Он проследил наследование окраски корнеплодов у гибридов при скрещивании желтоокрашенной кормовой и белоокрашенной сахарной свеклы. Исходя из полученных данных, Б. Каянус выдвинул гипотезу о наследовании окраски корнеплодов. Б. Каянус считал, что эти факторы наследуются независимо. В рецессивном состоянии фактор G (gelb – желтая кожица корнеплода) сдерживает синтез желтых пигментов, и растения характеризуются белой окраской корнеплода. При сочетании R (rot – красная кожица корнеплода) и G образуются красные корнеплоды. В. Келлер установил, что факторы R и G характеризуются значительным сцеплением (Keller, 1936): процент кроссинговера, по его данным, составил 7,5 %. Келлер, в отличие от Каянуса, описал уже 9 вариантов окраски корня у свеклы и добавил факторы R¹ и G¹. Наличие серии аллелей по генам R и G обуславливает большое разнообразие окраски корнеплодов у свеклы.

Работа профессора Гольдмана по проведению рекуррентного отбора в направлении усиления красно-фиолетовой окраски мякоти корня продемонстрировала положительный эффект (Goldman et al., 1996). Мерилом признака служила концентрация бетацианинов. Было показано изменение цвета мякоти и распределение пигмента в корнеплоде после 14 поколений отбора. Концентрация изученных пигментов возросла в два раза по сравнению с исходными растениями. Такой же результат показал и рекуррентный отбор желтоокрашенных генотипов. Результаты исследования Гольдмана со всей очевидностью демонстрируют, что окраска корнеплода у свеклы наследуется как количественный признак. Данный вывод позволяет вести селекцию на увеличение содержания бетанина в сортах столовой свеклы с помощью сочетания инбридинга и аутбридинга на материалах с высоким его содержанием.

Образование и накопление беталаиновых пигментов в растениях столовой свеклы является динамическим процессом, зависящим как от особенностей конкретного сорта, так и от различных факторов внешней среды, а также от зрелости корнеплодов, их размеров, агротехники и почвенного плодородия (Vulić et al., 2013). В ходе онтогенеза биосинтез пигментов изменяется (Mgli-nets, Osipova, 2010). Известно, что содержание пигментов выше у холодостойких сортов свеклы. Также ранее исследователями отмечалась отрицательная корреляция между размером корнеплода и процентным содержанием красящих веществ. Изучение динамики накопления пигмента в различных агроэкологических условиях важно для подбора оптимальных условий выращивания и времени уборки урожая.

Цель данной работы – выявить морфометрические особенности в онтогенезе растений, выращенных в различных агроэкологических зонах РФ, а также другие факторы, влияющие на динамику накопления бетанина в перспективных образцах столовой свеклы из коллекции ВИР

Материалы и методы

В исследовании участвовала группа из 29 образцов, ранее отмеченных нами как перспективные при проведении скрининга коллекции ВИР на содержание бетанина (Sokolova, Solovieva, 2019). Все образцы различаются как по морфологическим признакам, так и по происхожде-

нию. Стандартом (St.) послужил сорт 'Бордо 237', районированный для всех регионов РФ. Полевые опыты проводили по единой методике (Bugenin, 1989) в 2015 году на научно-производственной базе (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (Санкт-Петербург, г. Пушкин) Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР) и в 2018 году одновременно в трех географических пунктах: в НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», на Волгоградской опытной станции – филиале ВИР (ВОС ВИР, Краснослободск, Волгоградская обл.), и Майкопской опытной станции ВИР – филиале ВИР (МОС ВИР, г. Майкоп, Краснодарский край). Исследования проводили на естественном фоне без применения удобрений. Площадь учетных делянок – 10 м². Повторность опыта трехкратная. Размещение сортов рандомизированное. Забор растительного материала проводили в период с августа по конец сентября.

При оценке устойчивости листьев свеклы к церкоспорозу и вредителям использовали следующую 5-балльную шкалу: 0 баллов – поражение или повреждения отсутствуют; 1 – поражено до 20% площади листовой поверхности; 2 – 21–40%; 3 – 41–60%; 4 – 61–80%; 5 – 81–100%. Оценка пораженности корнеплодов корневыми гнилями (фомоз, бактериоз) рассчитывалась по балльной системе: 0 – полное отсутствие болезней; 1 – поражено 1–5% корнеплодов с делянки; 2 – поражено 6–20%; 3 – поражено 21–40%; 4 – поражено 41–60%; 5 – поражено более 61% корнеплодов с делянки. Оценка качества семенного материала проводилась в полевых условиях по

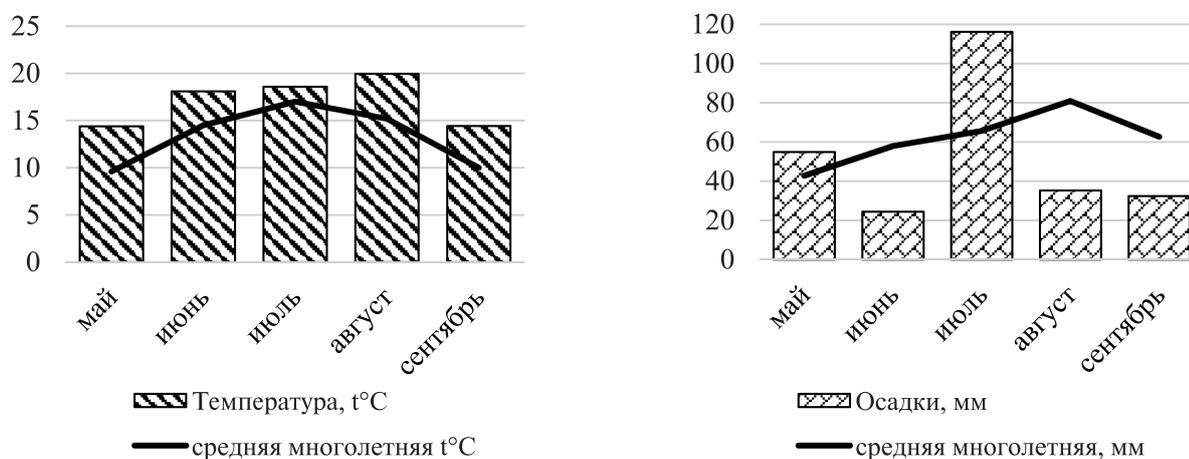
показателям энергии прорастания (на 5 день) и всхожести (на 7 день).

Фильтрат из корнеплодов исследовали в лаборатории биохимии компании АО «ЭКО РЕСУРС» – российского производителя пищевых красителей – методом спектрометрии на отечественном аппарате «Спектрофотометр СФ-2000», диапазон спектральных измерений которого составляет от 190 до 1100 нм, допустимая абсолютная погрешность коэффициента пропускания – до 1%, спектральная ширина – до 1 нм. Полученные экспериментальные данные обрабатывали стандартными методами статистического анализа с использованием программ Excel и Statistica 7,0.

Основная часть

Первым этапом работы в 2015 г. было изучение динамики накопления бетанина у набора из 29 образцов в условиях г. Пушкина для сужения поиска и уменьшения количества опытных образцов с целью последующего проведения эколого-географических исследований. Изученные образцы были отобраны нами ранее при скрининге коллекции как перспективные. Разница между результатами анализа составила 13 дней. Диаграмма 1 отражает погодные условия вегетационного периода 2015 года. Можно отметить крайне неравномерное выпадение осадков при повышенной среднемесячной температуре воздуха. Так, в июле проливные дожди способствовали активному росту вегетативной массы растений столовой

Диаграмма 1. Климатическая характеристика 2015 года (г. Пушкин)
Diagram 1. Climate characteristics of the 2015 growing season (Pushkin)



свеклы, в последующем в фазу активного роста и запасаения питательных веществ корнеплодом отмечалась нехватка влаги до самой уборки корнеплодов. В целом погодные условия 2015 года можно назвать благоприятными для выращивания изучаемой культуры.

В таблице 1 отражены данные динамики накопления бетанина. В течение августа 2015 года в условиях Пушкина за 13 дней концентрация бетанина в сортах столовой свеклы возросла. В среднем прибавка составила 46 мг/100 г (41,3%). Отрицательной динамики не отмечалось. У некоторых образцов уровень бетанина за 13 дней поднялся более чем в три раза. У части образцов содержание пигмента осталось на прежнем уровне. Сорт 'Детройт рубиновый 5' (к-3677, Россия) показал высокий результат на уровне 250 мг/100 г уже к первому забору материала, но в дальнейшем накопление пигмента не

прослеживалось. Значимой связи содержания пигмента со скороспелостью не выявлено. Можно отметить, что уровень бетанина у сортов с цилиндрической формой корнеплода был ниже среднего. Скороспелый сорт 'Египетская плоская' также не накапливал значительного содержания пигмента. Максимум бетанина получено у сорта 'Sterling Dark Red' (к-412, США) – 320 мг/100 г, причем этот образец показал наибольшую прибавку в содержании пигмента за 13 дней – 220%. Образец поступил в коллекцию ВИР в 1928 году, отличается сильной облиственностью и толстым разветвленным корнем, что предполагает активный процесс обмена веществ у подобных форм. Повышенное содержание бетанина у стародавних форм отмечалось ранее исследователями и объяснялось вероятным действием направления селекции: главное внимание в течение длительного вре-

Таблица 1. Динамика накопления бетанина у опытных образцов столовой свеклы (Пушкин, 2015 г)
Table 1. Dynamics of betanin accumulation in red beed accessions (Pushkin, 2015)

1 анализ / 1 analysis 09.08.2015		2 анализ / 2 analysis 22.08.2015		Изменение содержания бетанина* / Betanin change dynamics	
мг/100 г	Кол-во образцов	мг/100 г	Кол-во образцов	%	Кол-во образцов
менее 100	2	менее 100	1	0	5
100 – 149	20	100 – 149	7	1 – 49	17
150 – 199	4	150 – 199	12	50 – 99	5
200 и более	4	200 и более	10	100 и более	3
St. – 130	–	St. – 180	–	38	–

* отрицательной динамики не отмечено
 * no negative dynamics detected

мени селекционеры уделяли увеличению сырой массы корнеплодов, что, в свою очередь, приводило к снижению содержания бетанина (Esunina et al., 1979).

Таким образом, ведущее значение в нашем исследовании имел конкретный генотип изучаемой культуры, его способность к активному процессу метаболизма. Статистически достоверных взаимосвязей морфологических особенностей растений и динамики накопления бетанина не выявлено.

Проведение второго этапа изучения в различных эколого-географических зонах было инициировано с целью выявления влияния погодных условий конкретного пункта исследования и подбора оптимальной зоны для выращивания столовой свеклы, дающей наибольший выход бетанина у выделенной группы из шести образцов с наилучшими показателями по результатам 2015 г. Для эколого-географических исследований были выбраны три контрастных пункта выращивания.

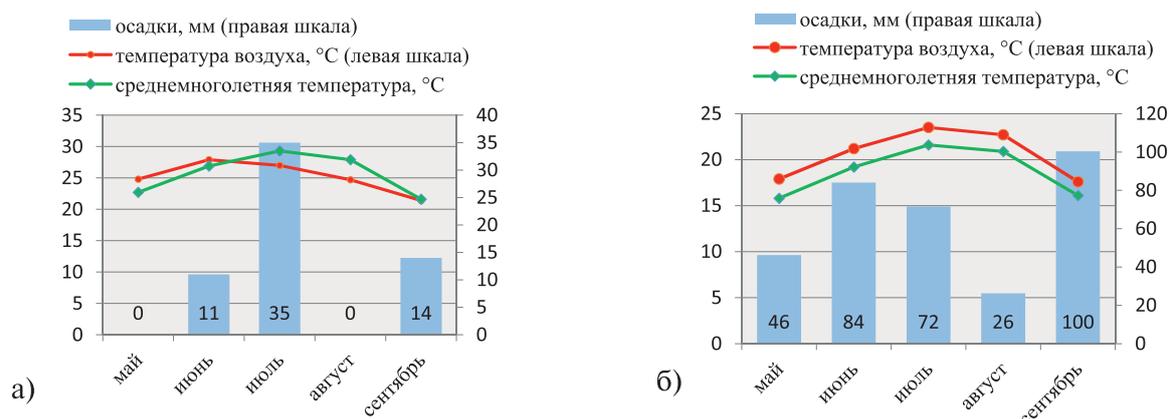
Погодные условия вегетационного периода 2018 г. в пунктах изучения носили крайне контрастный характер. Волго-Ахтубинская пойма Волгоградской области, на территории которой находится Волгоградская опытная станция ВИР, – один из крупнейших в России регионов по выращиванию овощной продукции. Климат резко континентальный. Почвы – аллювиальные суглинки. Весна короткая, сухая с быстрым нарастанием дневных температур и частыми ветрами. Лето сухое, знойное. Сумма активных температур (выше плюс 10°C) с 22 мая по 27 сентября 2018 г. составила 3291°C. Погодные условия 2018 г. отличались сильной засухой. Недостаток

влаги составил 113 мм по сравнению со среднемноголетними данными. В период появления всходов и в фазе «вилочки» (появления между семядольными листьями почки, образующей в дальнейшем первую пару настоящих листьев) отмечалось полное отсутствие дождей (май), что вызвало необходимость применения орошения на посевах (диаграмма 2, а). Температурный режим значительно отличался от многолетних данных.

Майкопская опытная станция ВИР расположена в долине реки Белая в 20 км к югу от г. Майкопа. Климат Северного Кавказа континентальный, умеренно теплый. Почвы черноземовидные, тяжелосуглинистые. Агроклиматические показатели данной территории показывают большую изменчивость, что отражается и на темпе роста, развитии и урожайности овощных культур. Годовой ход температуры имеет ярко выраженный характер. Безморозный период составляет около 200 дней, длина вегетационного периода колеблется в пределах 140–150 дней. Майкопская ОС ВИР находится в зоне достаточного увлажнения. Среднее многолетнее годовое количество осадков составляет 807 мм. Осадки обладают большой изменчивостью по годам, особенно в летние месяцы. В 2018 году недостаток дождей (–81,4 мм по сравнению со среднемноголетними данными) негативно отразился на вегетации растений столовой свеклы (диаграмма 2, б). На фоне высоких дневных температур (в среднем на 2°C выше многолетних значений) и недостатка влаги в июле – августе нарастание корнеплодов и, соответственно, накопление питательных веществ, происходило крайне медленно.

Диаграмма 2. Климатическая характеристика вегетационного периода 2018 года. Волгоградская (а) и Майкопская (б) опытные станции ВИР

Diagram 2. Climate characteristics of the 2018 growing season. Volgograd (a) and Maikop (b) Experiment Stations of VIR



Погодные условия 2018 г. в НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» в целом были наиболее благоприятны для получения хорошего урожая столовой свеклы. Сумма активных (выше плюс 10°C) температур с 21 мая по 15 сентября составила 2502°C, сумма осадков – 251,1 мм, что на 75 мм меньше среднемноголетних значений.

Результаты эколого-географического изучения накопления бетанина показаны на рисунке 2. Содержание пигмента колебалось в пределах 49–151 мг/100 г, что ниже результатов 2015 года изучения. В зависимости от пункта выращивания концентрация пигмента значительно отличалась: в Пушкине она составила 98–151 мг/100 г; на Волгоградской ОС – 49–78 мг/100 г;

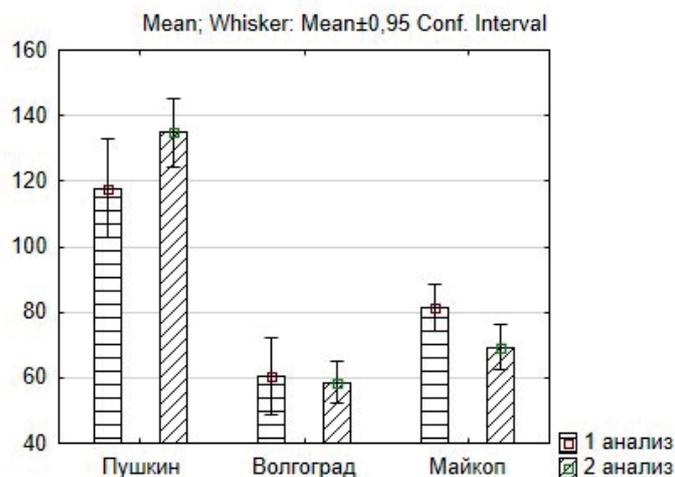


Рис. 2. Содержание бетанина в образцах столовой свеклы в трех пунктах изучения (мг/100 г, 2018 г)
Fig. 2. The content of betanin in table beet accessions at the three test sites (mg/100 g, 2018)

на Майкопской ОС – 57–91 мг/100 г. Изучение накопления пигмента в условиях Волгограда и Майкопа показало отрицательную динамику.

Для определения доли влияния факторов «пункт испытания» и «сорт» на содержание бетанина в образцах был проведен двухфакторный дисперсионный анализ (табл. 2). Как показали его результаты, доля вклада изучаемых факторов в накопление бетанина у столовой свеклы тесно связана с агрометеорологическими условиями в конкретном пункте выращивания. При неблагоприятных условиях сортовые различия нивелировались.

Вклад фактора «пункт испытания» был крайне значительным и возрос ко второму отбору проб на анализ с 84 до 95%. Полученный результат свидетельствует о крайне сильном влиянии агрометеорологических условий выращивания на содержание и накопление пигмента бетанина в корнеплодах столовой свеклы.

Анализируя причины снижения содержания бетанина, мы провели сравнительное изучение показателей качества семенного материала и составляющих полученного урожая (табл. 3). Урожайность – это комплексная характеристика, включающая как непосредственно вес

Таблица 2. Вклад факторов «пункт испытания» и «сорт» в накопление бетанина в сортах столовой свеклы (двухфакторный дисперсионный анализ)

Table 2. Contribution of the 'test site' and 'cultivar' factors to betanin accumulation in red beet accessions (two-factor analysis of variance)

Факторы / Factors	df	MS	F факт.	F05	Вклад фактора, %
Результат первого анализа на содержание бетанина					
общая дисперсия 11940,44					
Сорт (Фактор А)	5	79,82	0,54	3,33	3,34
Место (Фактор Б)	2	5032,72	34,10	4,10	84,2
Взаимодействие (А и Б), прочие факторы	10	147,59	–	–	12,36
Результат второго анализа на содержание бетанина					
общая дисперсия 20484,94					
Сорт (Фактор А)	5	41,12	0,51	3,32	1,0
Место (Фактор Б)	2	9738,72	121,44	4,1	95,08
Взаимодействие (А и Б), прочие факторы	10	80,1	–	–	3,92

Таблица 3. Сравнительные данные эколого-географического изучения образцов столовой свеклы и динамики накопления бетанина
 Table 3. Comparative data of the environmental and geographic study of red beet accessions and the dynamics of betanin accumulation

Место изучения / Test site	Образец / Accession	Энергия прорастания семян, % / The energy of germination, %	Всхожесть, % / Germination, %	Средний вес одного корнеплода, г / Average root weight, g	Товарность, % / Marketability, %	Урожайность, кг/10 м ² / Yield, kg/10 m ²	Поражение, балл / Lesion, score				Содержание бетанина, мг/100 г / Betanin content, mg/100 g		Динамика Изменения / Dynamics of change
							Церкоспороз / Cercospora	Вредители / Insect pests	Фомоз, корневые гнили / root rot	1 анализ / 1 analysis	2 анализ / 2 analysis		
Пушкин	Pablo F1	62	100	145	60	16,9	3	0	3	133	122	-11	
	Бордо односемянная	38	89	313	80	32,5	1	1	2	102	140	+38	
	Детройт Рубиновый 5	68	100	171	75	12,0	1	1	1	123	133	+10	
	Red Cloud F1	34	96	190	90	21,3	2	0	0	125	130	+5	
	Русский борщ	68	100	183	95	21,4	1	1	0	126	151	+25	
	Бордо 237, St.	43	70	190	80	22,2	1	0	2	98	133	+35	
Волгоград	Pablo F1	40	98	550	51	32,3	0	0	0	78	50	-28	
	Бордо односемянная	38	100	880	42	52,8	1	0	0	67	67	0	
	Детройт Рубиновый 5	34	94	1030	32	58,1	1	1	0	50	64	+14	
	Red Cloud F1	40	96	680	56	39,2	0	1	0	56	56	0	
	Русский борщ	30	96	790	58	45,5	0	0	0	49	58	+9	
	Бордо 237, St.	53	100	830	41	42,2	0	1	0	64	57	-7	
Майкоп	Pablo F1	58	92	147	86	6,1	2	2	1	77	71	-6	
	Бордо односемянная	44	94	283	32	6,1	4	2	0	85	70	-15	
	Детройт Рубиновый 5	54	90	270	77	6,7	3	2	0	91	72	-19	
	Red Cloud F1	40	92	207	79	9,6	3	2	1	71	77	+6	
	Русский борщ	62	96	190	79	7,6	2	2	1	82	57	-25	
	Бордо 237, St.	43	81	160	61	6,2	2	2	1	81	69	-12	
	M±S _x	47,2±2,9	93,6±1,9	400,5±73	65,2±4,8	24,4±4,2				86±6,4	87,6±8,3		

корнеплодов с учетной деланки, так и их качественные характеристики: корнеплоды стандартных размеров (7–12 см в диаметре), без признаков заболеваний и повреждений вредителями, т. е. товарные корнеплоды. Товарность (%) рассчитывали по формуле:

$$\text{Товарность, (\%)} = (m/M) \cdot 100, \text{ где}$$

m – вес товарных корнеплодов с деланки, кг
 M – вес всех корнеплодов с деланки, кг

Показатели качества семенного материала у всех образцов были достаточно высокие. Полевая всхожесть составила в среднем 93,6%. Средний вес одного корнеплода (показатель потенциальной урожайности) значительно колебался в зависимости от пункта выращивания. Так, на Волгоградской ОС он составил 793 г, в Пушкине – 199 г, а на Майкопской ОС – 209 г.

Динамика накопления бетанина в разных пунктах выращивания значительно различалась. В условиях Пушкина она была положительная. За 33 дня корнеплоды накопили 5–38 мг/100 г бетанина. Исключение

составил сорт 'Pablo F1', у которого концентрация пигмента снизилась на 11 мг/100 г. В условиях Волгоградской ОС результаты были разнородны. За 30 дней сорта 'Бордо односемянная' и 'Red cloud F1' не накопили бетанина. Сорта 'Детройт рубиновый 5' и 'Русский борщ' показали прибавку содержания пигмента на 14 и 9 мг/100 г соответственно. Сорт 'Pablo F1' снизил показатель на 28 мг/100 г. Результаты анализа корнеплодов с Майкопской ОС были отрицательными – снижение содержания пигмента составило от 6 до 25 мг/100 г. Исключением стал сорт 'Red cloud F1', который за 23 дня накопил незначительное количество пигмента – 6 мг/100 г бетанина.

На всех станциях изучения проводилась оценка устойчивости сортов к распространенному заболеванию листового аппарата столовой свеклы – церкоспорозу. Церкоспороз – пятнистость листьев, вызываемая патогенным грибом *Cercospora beticola* Sacc. Проявляется болезнью на листьях в виде множественных округлых серовато-коричневых, обычно с бурой каймой некрозов размером 2–4 мм, что приводит к угнетению растений и остановке роста листьев (рис. 3, а, б). Это может приве-

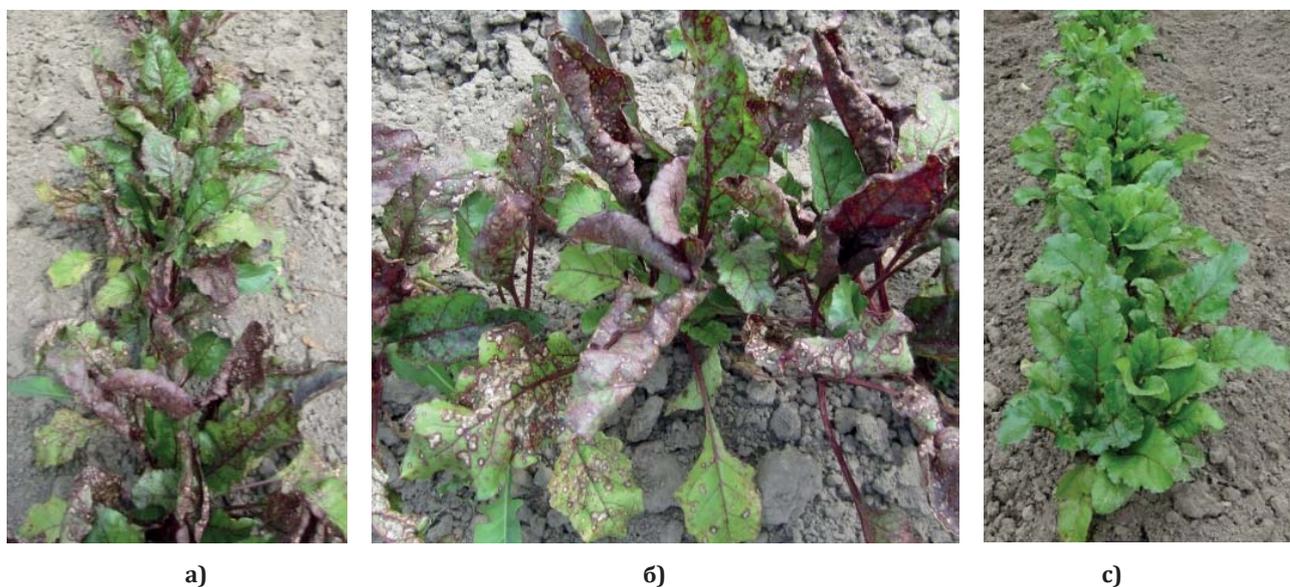


Рис. 3. Поражение листьев образца столовой свеклы 'Pablo F1' церкоспорозом (а, б) и относительно устойчивый образец 'Русский борщ' (с)

Fig. 3. The leaves of the beet cultivar 'Pablo F1' affected by *Cercospora* leaf spot (a, b) and the relatively resistant cultivar 'Russky borshch' (c)

сти к потере урожая до 50% при эпифитотийном течении болезни. Результатом поражения становится увеличение интенсивности транспирации и уменьшение ассимиляции углекислого газа и воды (в 8–10 раз). Впоследствии такие корнеплоды хуже хранятся, быстрее загнивают и теряют питательные вещества быстрее, чем здоровые. При значительном поражении и отмирании основного листового аппарата во время вегетации растения стараются компенсировать потерю ассимиляционной поверхности путем активной закладки и роста новых листьев, на что тратят много пластических веществ. Как следствие, вместо накопления сухих веществ происходит их потеря, что отражается в том числе и на содержании бетанина. Объяснить снижение растениями содержания пигмента на Майкопской ОС можно эпифитотией церкоспороза в 2018 г, которая привела к значительной потере листового аппарата. Поражение листьев растений насе-

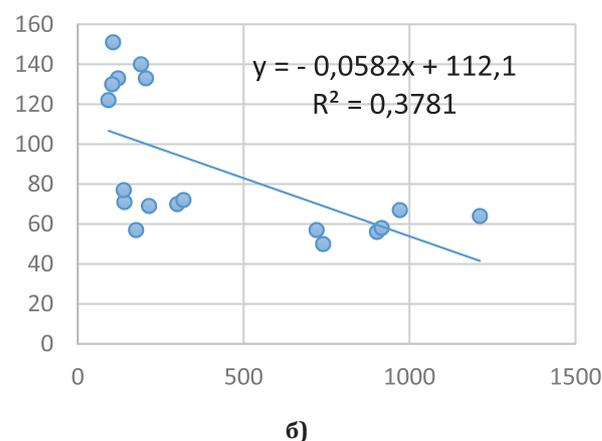
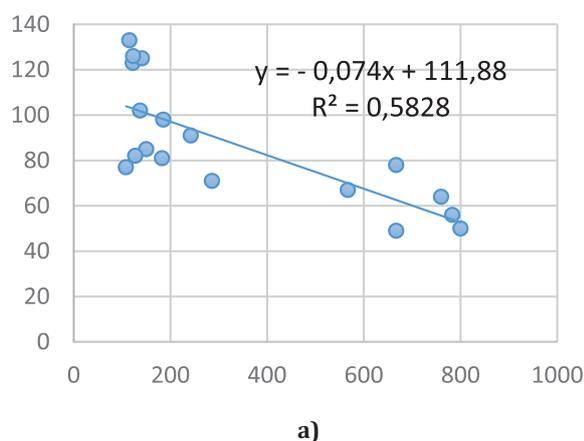
комыми имело такие же последствия для накопления бетанина, как и от заболевания церкоспорозом.

Можно отметить крайне низкую зараженность почвы возбудителями церкоспороза и других болезней на Волгоградской ОС, при этом применение орошения на станции привело к неограниченному росту массы корнеплода, что негативно сказалось на товарности полученного урожая и выходе бетанина.

Выявлена сильная отрицательная корреляция между весом корнеплода и содержанием пигмента ($r = -0,65; -0,73$). Регрессионный анализ показателей опыта (диаграмма 3) позволяет сделать вывод, что большая масса корнеплода отрицательно сказывалась на накоплении пигмента и характеризовалась меньшим содержанием бетанина: на каждые 100 г массы корнеплода выше среднего в опыте уровень бетанина был ниже на 5,8–7,4 мг в 38–58% случаев.

Диаграмма 3. Уравнение регрессии для среднего веса корнеплода и содержания в нем бетанина (а – первый анализ, б – второй анализ)

Diagram 3. The regression equation for the average root weight and the content of betanin (a – the first analysis, b – the second analysis)



Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что накопление бетанина у столовой свеклы сопряжено в первую очередь с агроклиматическими условиями выращивания. Оптимальной из протестированных зон для выращивания изученных сортов является Ленинградская область, дающая наивысшие показатели по накоплению бетанина. Ориентиром в подборе сортов для выделения пигмента или создания сортов с высоким содержанием бетанина служит генотип конкретного образца, его способность максимально раннего и высокого накопления пигмента, чтобы нивелировать возможные негативные влияния погодных условий.

Проведенные эколого-географические испытания селекционного материала столовой свеклы выявили неодинаковую способность к накоплению изучаемого пигмента между сортами и значительную разницу в его концентрации. Раннеспелые сорта не накапливали высокого содержания бетанина, среднеспелые сорта показали максимальный уровень из полученных данных, позднеспелые сорта при более крупных корнеплодах отличались пониженным содержанием пигмента. Болезни и вредители способствовали замедлению и остановке аккумуляции бетанина. Потеря части листового аппарата вызвала снижение уровня пигмента у части образцов. Выделена группа среднеспелых сортов, обладающих относительной устойчивостью к церкоспорозу: 'Бордо односемянная' (к-3151, Россия), 'Детройт рубиновый 5' (к-3677, Россия) и 'Русский борщ' (к-3716, Россия).

Процесс накопления пигмента крайне чувствителен к погодным условиям, водному балансу почвенного раствора и равномерности поступления влаги. Сила негативного воздействия этих факторов нивелирует сортовые различия культуры. Результаты опыта подтвердили отрицательную корреляцию между содержанием бетанина и весом корнеплода. Комплексная агроэкологическая оценка опытных образцов дала возможность рекомендовать для выращивания с целью выделения красителя бетанина в условиях Ленинградской области сорта столовой свеклы 'Бордо односемянная' (к-3151, Россия), 'Детройт рубиновый 5' (к-3677, Россия) и 'Русский борщ' (к-3716, Россия), дающие при благоприятных условиях высокий выход бетанина – 250 мг/100 г.

Автор выражает благодарность компании – российскому производителю пищевых красителей АО «ЭКО РЕСУРС» (*eco-resource.ru*) за многолетнюю всестороннюю помощь в проведении исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 0662-2019-0003, «Генетические ресурсы овощных и бахчевых культур мировой коллекции ВИР: эффективные пути расширения разнообразия, раскрытия закономерностей наследственной изменчивости, использования адаптивного потенциала». Номер государственной регистрации АААА-А19-119013090157-1.

References/Литература

- Azeredo H.M.C. Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. *Intern. J. Food Sci. Technol.* 2009;44(12):2365-2376. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x
- Burenin V.I. Methodological guidelines for the study and maintenance of the world collection of root crops (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i podderzhaniyu mirovoy kollektsii korneplodov). Leningrad; 1989. [in Russian] (Буренин В.И. Методические указания по изучению и поддержанию мировой коллекции корнеплодов. Ленинград; 1989).
- Burenin V.I., Ludilov V.A., Sokolova D.V. Integrated research of red beet gene pool. *Potato and Vegetables*. 2016;(2):39-40. [in Russian] (Буренин В.И., Лудилов В.А., Соколова Д.В. Комплексное исследование генофонда столовой свеклы. Картофель и овощи. 2016;(2):39-40).
- Esunina A.I., Lucovnicova G.A., Burenin V.I. Biochemical characteristics of collection samples of beets. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1979;65(1):34-41. [in Russian] (Есюнина А.И., Луковникова Г.А., Буренин В.И. Биохимическая характеристика коллекционных образцов свеклы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1979;65(1):34-41).
- Gins M.S., Platonova E.K., Platonova S.Y. Perspective sources of natural dyes from vegetative raw material. *RUDN Journal*

- of Agronomy and Animal Industries*. 2016;(1):34-42. [in Russian] [Гинс М.С., Платонова Е.К., Платонова С.Ю. Перспективные источники получения натуральных пищевых красителей из растительного сырья. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*. 2016;(1):34-42).
- Goldman I.L., Eagen K.A., Breitbach D.N., Gabelman W.H. Simultaneous selection is effective in increasing betalain pigment concentrations but not total dissolved solids red beet. *J. Amer. Soc. Horticult. Sci.* 1996;121(1):23-26. DOI: 10.21273/JASHS.121.1.23
- Kajanus B. Über die Farbenvariation der Beta-Rüben. *Z. für Pflanzenzüchtung*. 1917;5(4):357-372. [in German]
- Keller W. Inheritance of some major color types in beet. *Journal of Agricultural Research*. 1936;52(1):27-38.
- Mabry T.J., Dreiding A.S. The betalains. In: Mabry T.J., Alston R.E., Runechles V.C. (eds). *Recent advances in phytochemistry. Vol. 1*. New York: Appleton-Century-Crofts; 1968. p.145-160.
- Mabry T.J., Wyler H., Sassu G., Mercier M., Parikh J., Dreiding A.S. Die Struktur des Neobetanidins: Über die Konstitution des Randenfarbstoffes Betanin. *Helv. Chim. Acta*. 1962;45:640-647. [in German]
- Mglinets A.V., Osipova Z.A. Formation of root color and its genetic control in fodder beet. *Informatsionnyi vestnik VOGiS = Information Bulletin of the All-Russian Society of Genetics and Breeding*. 2010;14(4):720-728. [in Russian] [Мглинец А.В., Осипова З.А. Генетический контроль формирования окраски корнеплода у кормовой свеклы. *Вестник ВОГиС*. 2010;14(4):720-728).
- Piattellii M., Minale L. Pigments of Centrospermae-II. Distribution of betacyanins. *Phytochemistry*. 1964;(3):547-557.
- Shachek T.M., Plitko T.Y., Sevostyanov S.M. Development of a way of receiving a natural dyestuff from beet. *Scientific Aspirations*. 2017;(21):35-39. [in Russian] [Шачек Т.М., Плитко Т.Ю., Севостьянов С.М. Разработка способа получения натурального красителя из свеклы. Научные стремления. 2017;(21):35-39).
- Sleptsov I.V., Voronov I.V., Zhuravskaya A.N., Poskachina E.R. Isolation and identification betacyanins pigments from *Beta vulgaris* and *Amaranthus retroflexus*. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2015;(3):111-115. [in Russian] [Слепцов И.В., Воронов И.В., Журавская А.Н., Поскачина Е.П. Выделение и идентификация бетацаниновых пигментов из *Beta vulgaris* и *Amaranthus retroflexus*. *Химия растительного сырья*. 2015;(3):111-115]. DOI: 10.14258/jcprm.201503757
- Sokolova D.V., Solovieva A.E. Promising starting material for selection of beet varieties with a high content of betanin. *Agrarnaya Rossiya = Agrarian Russia*. 2019;(8):26-32. [in Russian] [Соколова Д.В., Соловьева А.Е. Перспективный исходный материал для селекции сортов свеклы с высоким содержанием бетанина. *Аграрная Россия*. 2019;(8):26-32]. DOI: 10.30906/1999-5636-2019-8-26-32
- Vulić J.J., Čebović T.N., Čanadanović V.M., Četković G.S., Djilas S.M., Čanadanović-Brunet J M., Velićanski A.S., Cvetković D.D., Tumbas V.T. Antiradical, antimicrobial and cytotoxic activities of commercial beetroot pomace. *Food Funct*. 2013.4(5):713-721. DOI: 10.1039/c3fo30315b
- Willstatter R. Untersuchungen der Anthocyane. *Naturwissenschaften*. 1932;20(33):612-618. [in German]

Прозрачность финансовой деятельности/The transparency of financial activities

Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

The author declares the absence of any financial interest in the materials or methods presented.

Для цитирования/How to cite this article

Соколова Д.В. Эколого-географическое изучение накопления бетанина у перспективных образцов столовой свеклы коллекции ВИР. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019;180(4):66-74. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-4-66-74

Sokolova D.V. Environmental and geographic study of betanin accumulation in promising red beet accessions from the VIR collection. Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2019;180(4):66-74. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-4-66-74

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы/The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work

Дополнительная информация/Additional information

Полные данные этой статьи доступны/Extended data is available for this paper at <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-4-66-74>

Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы/The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employer

Автор одобрил рукопись/Author approved the manuscript

Конфликт интересов отсутствует/No conflict of interest