Вавиловский журнал генетики и селекции. 2022;26(1):30-39
DOI 10.18699/VJGB-22-05

Перевод на английский язык https://vavilov.elpub.ru/jour

Динамические изменения содержания бетанина в столовой свекле в течение вегетационного периода: их взаимодействие с абиотическими факторами

Д.В. Соколова

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), Санкт-Петербург, Россия
dianasokol@bk.ru

Аннотация. Для производства натурального пищевого красителя красного цвета используется широко распространенная корнеплодная культура – столовая свекла, характеризующаяся лечебными, антиоксидантными свойствами, скороспелостью, длительной сохранностью корнеплодов, высоким содержанием биологически активных веществ, витаминов и минеральных элементов. Актуальность исследования продиктована недостатком знаний о динамических изменениях в содержании бетанина в течение вегетации при создании сортов свеклы, ориентированных на получение красителя. В работе приведены результаты изучения 29 краснокрашенных образцов коллекции столовой свеклы Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Наблюдение за динамическими изменениями содержания пигмента в процессе вегетации выполнено на двух образцах свеклы: ‘Русская односемянная’ и ‘Бордо односемянная’. Приведены результаты тестирования четырех вариантов pH буферного раствора. Рекомендован буферный раствор с pH 6.5. В результате исследования определена амплитуда изменчивости содержания бетанина в кожице (39.9–239.2 мг/100 г) и мякоти (14.4–127.5 мг/100 г) корнеплодов столовой свеклы. Подтверждено, что содержание бетанина в кожице у всех образцов превышало его содержание в мякоти. Выявлена положительная взаимосвязь этих показателей ($r = 0.74$, $p \leq 0.05$). Установлено, что в процессе вегетации значимой аккумуляции бетанина в корнеплодах не происходит. Показаны значительные колебания пигмента, сопряженные с абиотическими факторами среды. Определены корреляционные связи между температурой воздуха и бетанином в мякоти корнеплода ($r = 0.32–0.31$, $p \leq 0.05$). Отрицательный эффект температуры среды на бетанин в кожице проявлялся на третьи сутки ($r = –0.34…–0.35$, $p \leq 0.05$). Негативная реакция на осадки была менее выражена у сорта ‘Бордо односемянная’, благодаря более активному метаболизму и пластичности генотипа. Описаны морфологические особенности строения фотосинтетического аппарата опытных образцов, отмечены взаимосвязи с изучаемым признаком. Даны рекомендации по выбору схемы посадки и сроков уборки урожая столовой свеклы для выделения красителя.
Ключевые слова: бетанин; натуральный пищевой краситель; динамика; кожица; мякоть; *Beta vulgaris* L.; факторы среды.

Для цитирования: Соколова Д.В. Динамические изменения содержания бетанина в столовой свекле в течение вегетационного периода: их взаимодействие с абиотическими факторами. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022;26(1):30-39. DOI 10.18699/VJGB-22-05

Dynamic changes in betanin content during the growing season of table beet: their interplay with abiotic factors

D.V. Sokolova

Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia
dianasokol@bk.ru

Abstract. The table beet, a widespread edible root crop known for its medicinal and antioxidant properties, early maturation, good shelf life, and high contents of bioactive compounds, vitamins and minerals, is used for the production of a natural red food dye. The relevance of this study is dictated by the lack of knowledge about the dynamic changes in the content of betanin during the growing season when developing table beet cultivars with a focus on pigment extraction. The article presents the results of a study of 29 red-colored table beet accessions from the collection of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR). Dynamic changes in the content of the pigment during the growing season were observed on two beet accessions, cvs. ‘Russkaya odnosemyannaya’ and ‘Bordo odnosemyannaya’. Four pH versions of the buffer solution were tested, and the test results are presented. A buffer solution with pH 6.5 is recommended for research purposes. The amplitude of variability in the content of betanin in the peel (39.9–239.2 mg/100 g) and flesh (14.4–127.5 mg/100 g) of beets was determined. It was confirmed that the content of betanin in the peel exceeded that in the flesh in all samples. A positive relationship between these indicators was revealed ($r = 0.74$, $p \leq 0.05$). It was found that betanin accumulation did not occur in beet roots during the growing

© Соколова Д.В., 2022
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0

season. The pigment showed considerable fluctuations associated with abiotic environmental factors. Correlation analysis showed a significant positive relationship between air temperature and betanin content in the root flesh (r = 0.32–0.31, $p \leq 0.05$). A negative impact of environmental temperature on betanin content in the peel manifested itself on the third day (r = –0.34…–0.35, $p \leq 0.05$). The negative response to precipitation was less expressed in cv. 'Bordo odnosemyannaya' due to the genotype's more active metabolism and plasticity. Structural morphological features of the photosynthetic apparatus were described for the tested accessions, and their interrelations with the studied character were specified. Recommendations are given concerning the choice of a planting pattern and the timing of table beet harvesting for pigment extraction.
Key words: betanin; natural food coloring; dynamics; peel; flesh; *Beta vulgaris* L.; environmental factors.

For citation: Sokolova D.V. Dynamic changes in betanin content during the growing season of table beet: their interplay with abiotic factors. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(1):30-39. DOI 10.18699/VJGB-22-05

Введение

Используемые в промышленности оттенки красного цвета производятся в основном двумя группами растительных пигментов: антоцианами и беталаинами. Большинство цветковых растений вырабатывает красно-фиолетовые пигменты – антоцианы (Юдина и др., 2021). Исключение составляют представители нескольких семейств порядка *Caryophyllales*, в которых синтезируются беталаины.

Бетанин (бетанидин 5-О-β-глюкозид) – основной пигмент (70–95 %) в группе беталаинов (von Elbe, 2001; Sawicki et al., 2016). Он представляет собой гликозид: его сахарной частью служит глюкоза, а агликоном – бетанидин. Это нетоксичное соединение, проявляющее выраженные противовоспалительные, антиканцерогенные и антиоксидантные свойства, что вызывает интерес к нему не только при производстве продуктов питания, но и в фармацевтической и косметической промышленности (Jiratanan, Liu, 2004; Tesoriere et al., 2004; Stintzing, Carle, 2007). Важное преимущество красителя бетанина над антоцианами – стабильность в диапазоне pH от 3 до 7, что позволяет использовать его для окрашивания продукции как с кислой, так и с нейтральной средой (Herbach et al., 2006). В то же время значимым недостатком бетанина считается деградация пигмента при нагревании – молекула бетанина в результате декарбоксилирования теряет свои свойства и преобразуется в необетанин (Aztatzi-Rugerio et al., 2019).

Основными источниками бетанина служат корнеплоды столовой свеклы (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *conditiva* Alef.), плоды опунции (*Opuntia vulgaris* Mill.) и краснокрашенные формы амаранта (*Amaranthus* L.) (Cai et al., 1998; Castellanos-Santiago, Yahia, 2008). Главенствующее место занимает культура столовой свеклы, отличающаяся высокой урожайностью (50–60 т/га), экологической пластичностью и высоким выходом бетанина (Stintzing et al., 2000; Sokolova, 2018), что не позволяет конкурировать с ней другим источникам этого пигмента.

Использовать бетанин для колорирования продуктов питания научились еще в начале XX в.: им подкрашивали кондитерские изделия, сухие смеси, молочную и мясную продукцию. Известно применение красителя в виде сокового концентрата и сухого порошка, получаемого методом лиофильного высушивания или распылением (Nemzer et al., 2011). При изучении влияния обработки сырья свеклы на содержание пигмента методика включает обязательную очистку кожицы корнеплода (Azeredo et al., 2009; Burak, Zavaley, 2020), что, безусловно, необходимо для приготовления соков, для детского и диетического питания. Но при производстве красителя используется бланшировка целых корнеплодов, без удаления кожицы (Фролов, Чижик, 1997).

Считается, что образование и накопление беталаиновых пигментов, в частности бетанина, в растениях столовой свеклы являются динамическим процессом, зависящим как от конкретного генотипа, фазы онтогенеза, так и от различных факторов внешней среды, а также от зрелости корнеплодов, их размеров, агротехники и почвенного плодородия (Мглинец, Осипова, 2010; Vulić et al., 2013). На стабильность беталаина влияют многочисленные внешние и внутренние факторы: температура, кислотность, наличие или отсутствие света, кислорода, ферментов, азота и катионов металлов, степень гликозилирования и ацилирования. Эти результаты в большинстве случаев получены при изучении пигмента, выделенного из зрелых корнеплодов (Saguy et al., 1978; Saguy, 1979; Schliemann, Strack, 1998; Herbach et al., 2006).

Целью нашего исследования было проследить динамические изменения в содержании пигмента в процессе вегетации раздельно в кожице и мякоти корнеплодов столовой свеклы, выявить силу влияния факторов среды.

Материалы и методы

Объектом исследования послужила группа из 29 образцов краснокрашенной столовой свеклы (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef.) из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР). Наблюдение за динамическими изменениями содержания бетанина в процессе вегетации выполнено на двух образцах свеклы – 'Русская односемянная' (к-3698) и 'Бордо односемянная' (к-3151), отмеченных как наиболее перспективные при проведении скрининга и эколого-географического изучения коллекции ВИР в 2008–2018 гг. (Соколова, 2019; Соколова, Соловьева, 2019).

Полевые опыты проводили по единой методике (Изучение…, 1989) в 2020 г. на научно-производственной базе «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (г. Пушкин, Санкт-Петербург, Россия). Почвы в Пушкине преимущественно дерново-подзолистые супесчаные. Образцы выращивали на естественном фоне, без применения удобрений и пестицидов. Площадь учетных делянок 24 м^2. Посев произведен вручную 28 мая, уборка – 24 сентября. Расстояние между рядами 70 см, в ряду между растениями – 6–8 см.

Наблюдения за погодными условиями вегетационного периода осуществлялись на гидрометеостанции ВИР.

Условия 2020 г. были благоприятны для выращивания столовой свеклы и характеризовались умеренной температурой воздуха в течение всего периода. Сумма активных температур (выше +10 °C) с 20 мая по 24 сентября составила 2009 °C, сумма осадков за тот же период – 290 мм, что на 36 мм ниже среднемноголетних значений.

Забор корнеплодов сортов ‘Русская односемянная’ (к-3698) и ‘Бордо односемянная’ (к-3151) на анализ динамических изменений по содержанию пигмента проводили дважды в неделю с 13 июля по 24 сентября 2020 г. Содержание пигмента анализировали, используя раздельно кожицу (срезали ножом 1–2 мм) и мякоть десяти корнеплодов. Все измерения выполнены в течение 3 ч после извлечения корнеплодов из почвы. Сок опытного материала отжимали при помощи соковыжималки Bork JU CUP 21085 WT (Германия) и фильтровали через мембранный фильтр (0.45 мкм). Взвешивали по 1–1.5 г отфильтрованного сока и разбавляли его фосфатным буфером (pH 6.5) до метки 100 мл. Содержание бетанина определяли спектрофотометрическим методом при длине волны 538 нм. Измерение при 600 нм фиксировали для корректировки на наличие примесей. Пик поглощения при 538 нм отражает структуру и используется для анализа бетанина без выделения конкретных пигментов. Фильтрат из корнеплодов исследовали методом спектрометрии на двухлучевом спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Япония). Концентрацию бетанина (C_B) определяли по Нильсону (Nilsson, 1970) как

$$C_B = \frac{(A_{538} - A_{600}) \times \mathrm{V}}{1120 \times m},$$

где A_{538} и A_{600} – оптическая плотность при 538 и 600 нм соответственно; V – коэффициент разбавления; m – масса навески образца, г; 1120 – удельная абсорбция 1 % раствора бетанина в 1 см кювете.

Статистическую обработку данных выполняли в программах Excel и Statistica 8.0. Изменчивость структуры взаимосвязей признаков оценивали с помощью факторного анализа. Факторные нагрузки рассчитывали по методу главных компонент. Значения коэффициента корреляции Пирсона при $r < 0.3$ рассматривались как слабые, $0.3 < r < 0.5$ – умеренные, $0.5 < r < 0.7$ – заметные, $0.7 < r < 0.9$ – сильные, при $r > 0.9$ – как очень сильные.

Результаты и обсуждение

Бетанин имеет максимум светопоглощения в видимой области спектра при длине волны в диапазоне от 535 до 540 нм. Для подбора оптимального pH буферного раствора на примере сорта ‘Русская односемянная’ (к-3698, Россия) были протестированы четыре варианта pH (рис. 1). Наблюдались изменения в спектрах растворов бетанина с одинаковой начальной концентрацией в диапазоне pH 3–7.5. Незначительный гипохромный сдвиг происходил при значениях pH 3 и 7.5. Смещения максимума абсорбции не выявлено. В исследовании использовался фосфатный буферный раствор с pH 6.5.

Фенотипическое многообразие столовой свеклы принято группировать по сортотипам. Такая группировка основана на сходстве морфологических параметров (рис. 2). В данном исследовании изучались образцы шести сортотипов.

Наибольшей урожайностью отличалась группа образцов сортотипа Кросби (Crosby), характеризующаяся округлой формой корнеплода. Результат испытания 29 краснокрашенных образцов столовой свеклы показал, что на 24 сентября средняя урожайность составила 16.5 кг/10 м^2 (табл. 1). Показатель урожайности значительно варьировал в зависимости от генотипа конкретного образца ($p < 0.05$). Средняя масса одного корнеплода составила 127.9 г. Варьирование этого показателя внутри каждого сорта незначительное (коэффициент вариации Cv < 33.3 %), что свидетельствует о выровненности популяций. Исключение – сорт ‘Русская односемянная’ (к-3698) и местная сортопопуляция из Казахстана (к-3885), у которых коэффициент вариации равен 35.1 и 40.1 % соответственно.

Содержание бетанина на момент уборки значительно различалось и колебалось в широком диапазоне. Среднее значение в кожице составило 116.9 мг/100 г, в мякоти – 58.9 мг/100 г. Прослеживалась зависимость содержания

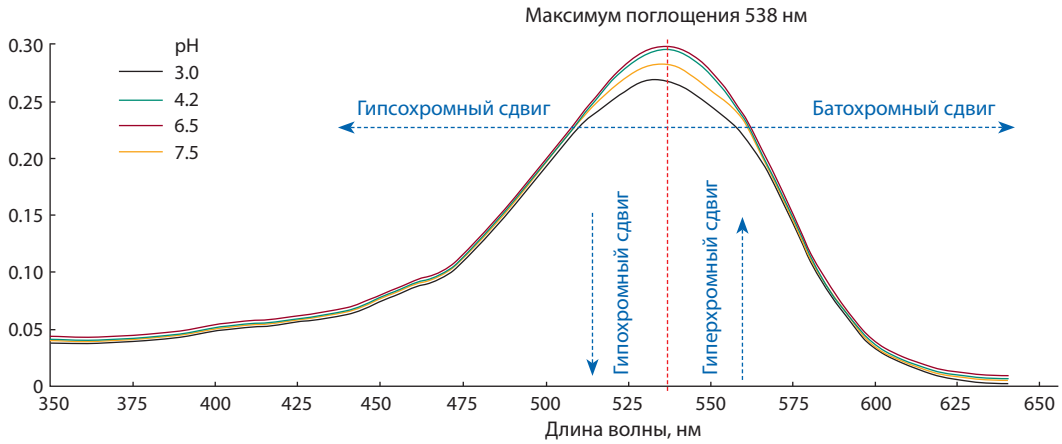

Рис. 1. Спектры растворов бетацианинов *Beta vulgaris* L. при различных pH буферного раствора. Сорт ‘Русская односемянная’ (к-3698).

По вертикали дана оптическая плотность растворов.

Зеленолистная | Краснолистная | Египетская плоская | Кросби | Бордо | Цилиндрическая

Рис. 2. Типы сортообразцов столовой свеклы в опыте.

Таблица 1. Урожайность и содержание бетанина 29 исследуемых образцов свеклы

Номер каталога ВИР	Название образца	Происхождение	Сортотип	Урожайность, кг/10 м²	Масса корнеплода, г		Бетанин*, мг/100 г	
					Mean ± SE	Cv, %	Кожица	Мякоть
7	Rouge naine de Dell	Франция	Бордо	11.92	101.0 ± 6.5	17.1	72.20	28.33
10	Rouge ronde precoce	»	Кросби	8.14	68.6 ± 4.8	18.6	59.77	14.38
478	Breck's beat's all	США	Кросби	17.46	148.3 ± 7.1	12.6	39.89	19.66
1297	Ранняя круглая	Россия	Бордо	12.27	103.9 ± 5.2	13.1	58.52	25.54
1561	Раннее чудо	»	Кросби	12.63	106.9 ± 5.8	14.5	55.74	26.57
1587	Crosby Egyptian	США	Египетская плоская	36.82	312.4 ± 17.2	14.6	191.93	44.23
1671	Донская плоская 367	Россия	Египетская плоская	7.43	62.7 ± 6.8	28.7	69.44	59.12
1757	Detroit dark red improved	Франция	Кросби	14.28	120.7 ± 7.1	15.5	107.22	87.42
1937	Burpee's Red Ball	США	Кросби	16.17	137.4 ± 3.4	6.5	154.66	54.41
1938	Forma nova	»	Цилиндрическая	10.62	90.3 ± 8.7	25.4	102.10	46.01
2040	Avonearly	Италия	Кросби	12.74	108.1 ± 5.4	13.3	142.45	77.17
2227	Vitenu Bordo	Литва	Кросби	10.03	84.6 ± 5.3	16.5	122.77	74.63
2237	Славянка	Россия	Кросби	10.74	90.9 ± 3.8	11.1	60.24	20.47
3012	Uniball	Нидерланды	Египетская плоская	4.37	37.4 ± 4.0	28.3	43.72	19.15
3110	Regala	»	Кросби	11.92	100.7 ± 5.2	13.7	133.63	69.86
3119	84/49	Россия	Бордо	8.40	69.9 ± 4.0	15.0	101.39	78.66
3151	Бордо односемянная	»	Кросби	31.20	264.6 ± 14.1	14.1	**239.20**	89.69
3595	Green top	Канада	Зеленолистная	13.72	98.3 ± 9.5	25.6	120.30	36.45
3600	Dwergina	Нидерланды	Кросби	27.86	198.7 ± 8.5	11.3	163.11	65.30
3627	Detroit Dark Red Morse	Мексика	Бордо	7.00	50.1 ± 3.2	17.1	67.92	55.93
3698	Русская односемянная	Россия	Кросби	28.90	133.4 ± 17.7	35.1	**225.57**	110.35
3718	Baby Beat	Нидерланды	Кросби	15.41	115.0 ± 4.6	10.7	157.02	75.39
3720	Zeppo	»	Кросби	23.45	174.9 ± 9.8	14.8	171.25	84.05
3721	Bulls Blood	»	Краснолистная	12.60	94.3 ± 7.7	21.5	73.96	44.56
3762	Bridzhit F1	»	Кросби	24.66	184.1 ± 13.4	19.3	86.53	58.57
3806	Креолка	Россия	Кросби	23.85	178.4 ± 6.9	10.2	130.29	47.74
3879	Manolo F1	Нидерланды	Кросби	38.86	289.7 ± 13.5	12.3	86.62	48.06
3885	Свекла местная	Казахстан	Египетская плоская	7.64	57.0 ± 8.6	40.1	174.62	127.54
3887	Свекла бордовая	»	Кросби	16.88	126.0 ± 7.7	16.1	177.09	106.46
Mean ± SE				16.5 ± 1.7	127.9 ± 12.8		116.9 ± 10.7	58.9 ± 5.5
$НСР_{05}$				6.65			25.0	

* Значение получено с 10 корнеплодов каждого образца.

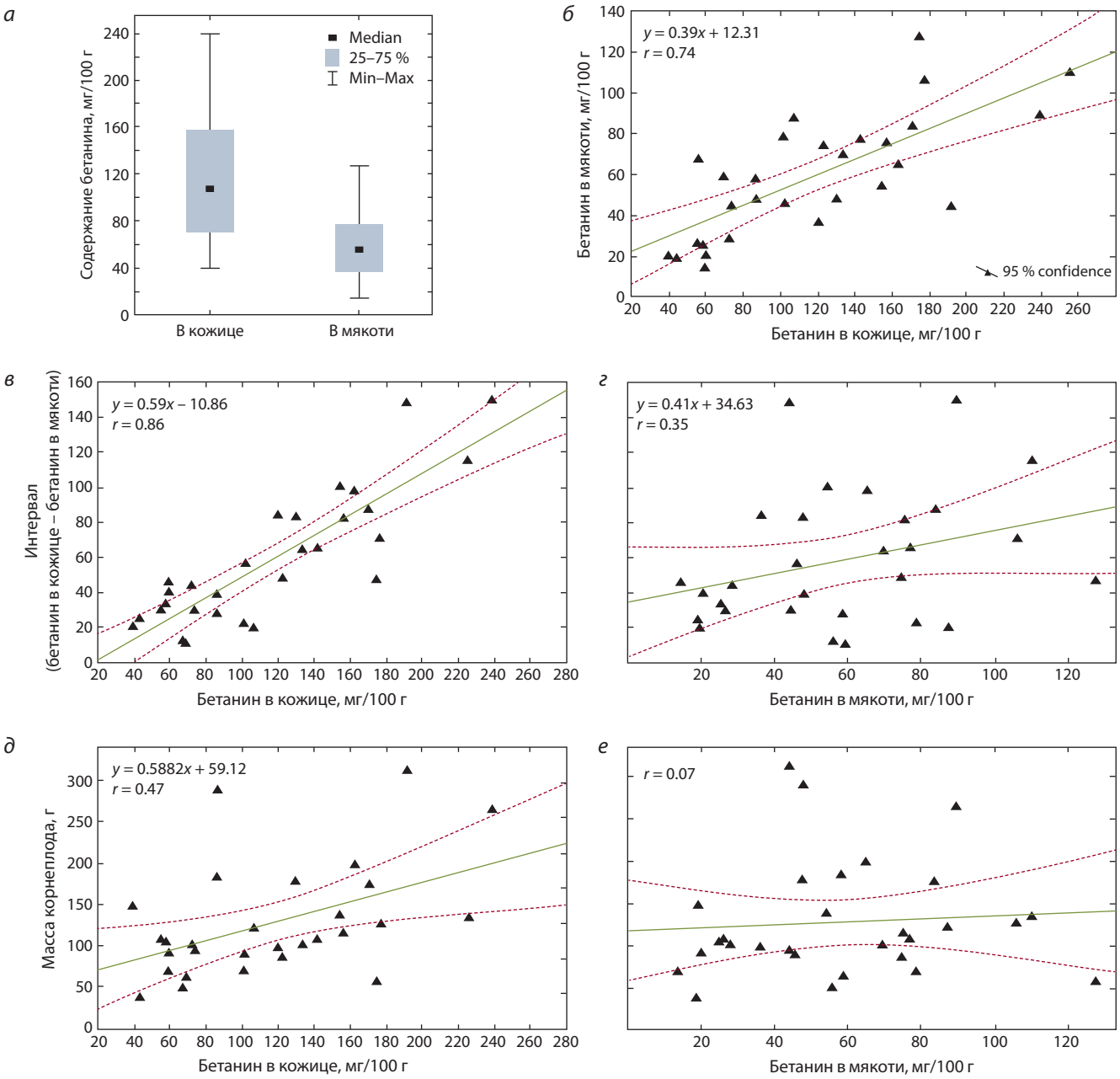

Рис. 3. Среднее содержание бетанина в кожице и мякоти корнеплодов столовой свеклы (*а*) и результаты линейного корреляционного анализа (*б–е*): *б* – корреляция между содержанием бетанина в кожице и мякоти красной свеклы; *в* – между бетанином в кожице и интервалом (бетанин в кожице – бетанин в мякоти); *г* – между бетанином в мякоти и интервалом; *д* – между бетанином в кожице и массой корнеплода; *е* – между бетанином в мякоти и массой корнеплода.

пигмента от морфологического типа корнеплода и интенсивности окраски. Подтверждены сделанные нами ранее выводы о предпочтении округлой и округло-овальной формы корнеплода для селекции на высокое содержание бетанина (Соколова, Соловьева, 2019). Стоит отметить и исключения, наблюдавшиеся среди плоскоокруглых образцов, как правило, являвшихся скороспелыми формами с невысоким содержанием бетанина (Соколова, 2019). Так, сорт американского происхождения ‘Crosby Egyptian’ (к-1587) и местная сортопопуляция из Казахстана ‘Свекла местная’ (к-3885) тоже отличались высокими значениями бетанина в кожице: 191.93 и 174.62 мг/100 г соответственно.

Максимальные содержания бетанина в кожице корнеплода отмечены у образцов отечественного происхождения ‘Бордо односемянная’ (к-3151) и ‘Русская односемянная’ (к-3698) – 239.20 и 225.57 мг/100 г соответственно. Эти генотипы представляют интерес для дальнейшей селекционной работы на увеличение содержания пигмента.

Раздельный анализ содержания бетанина в кожице и мякоти корнеплодов выявил статистически достоверные различия. Содержание пигмента в кожице у всех изученных образцов превышало этот показатель в мякоти (рис. 3, *а*). Минимальная разница отмечена у образца ‘Донская плоская 367’ (к-1671) – 10.3 мг/100 г. Максимальная разница у образца ‘Бордо односемянная’ соста-

вила 149.5 мг/100 г; при этом 73 % бетанина присутствует в кожице, а 27 % – в мякоти. Корреляционный анализ свидетельствует о наличии значимой положительной взаимосвязи между содержанием пигмента в кожице и мякоти (r = 0.74) (см. рис. 3, *б*). С увеличением количества бетанина в кожице увеличивается и интервал между показателями (r = 0.86) (см. рис. 3, *в*). В отличие от бетанина в кожице, значимой взаимосвязи содержания пигмента в мякоти и варьирования между показателями не обнаружено, что свидетельствует о его большей стабильности в мякоти в течение вегетации (см. рис. 3, *г*). То есть повышенное содержание пигмента связано преимущественно с бетанином в кожице.

Заметной корреляции ($r > 0.5$) между массой корнеплода и содержанием бетанина в кожице и мякоти не выявлено (см. рис. 3, *д*, *е*).

Для производства красителя из корнеплодов свеклы важно, чтобы содержание пигмента в общей биомассе было высоким. Схематично принимая форму корнеплода столовой свеклы за шар, можно рассчитать, как изменится соотношение объема и площади поверхности в зависимости от радиуса. Как видно на диаграмме (рис. 4), увеличение объема шара имеет кубическую зависимость, тогда как площадь поверхности – квадратичную. Экстраполируя теоретическую раскладку на объект нашего исследования, можно утверждать, что в предположении постоянства толщины кожицы у зрелых, готовых к уборке корнеплодов доля мякоти значительно превышает долю кожицы, что в итоге отрицательно отразится на выходе пигмента. У небольших корнеплодов на кожицу приходится бóльшая доля, чем у крупных. Можно предположить, что из мелких корнеплодов суммарный выход бетанина будет выше при условии высокого содержания пигмента на момент уборки урожая.

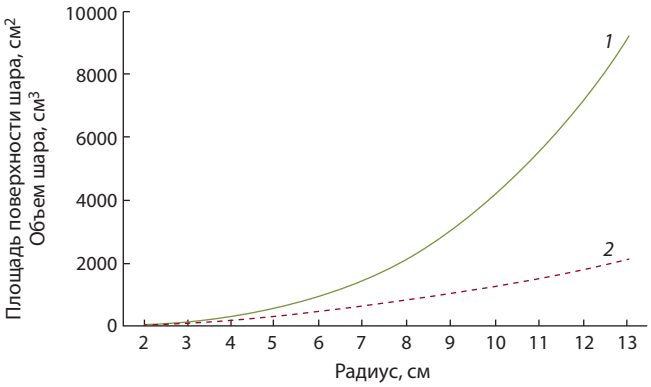

Рис. 4. Зависимость объема (*1*) и площади поверхности (*2*) шара от его радиуса.

Для изучения динамики нарастания корнеплода и аккумуляции пигмента раздельно в кожице и мякоти мы провели сравнительный анализ двух перспективных образцов свеклы: ‘Русская односемянная’ (к-3698) и ‘Бордо односемянная’ (к-3151). Материал для анализа отбирали 22 раза через равные промежутки времени с момента превышения корнеплодами веса 10 г. За вегетационный период значимого накопления бетанина в кожице и мякоти у обоих сортов не выявлено (рис. 5), что подтверждает

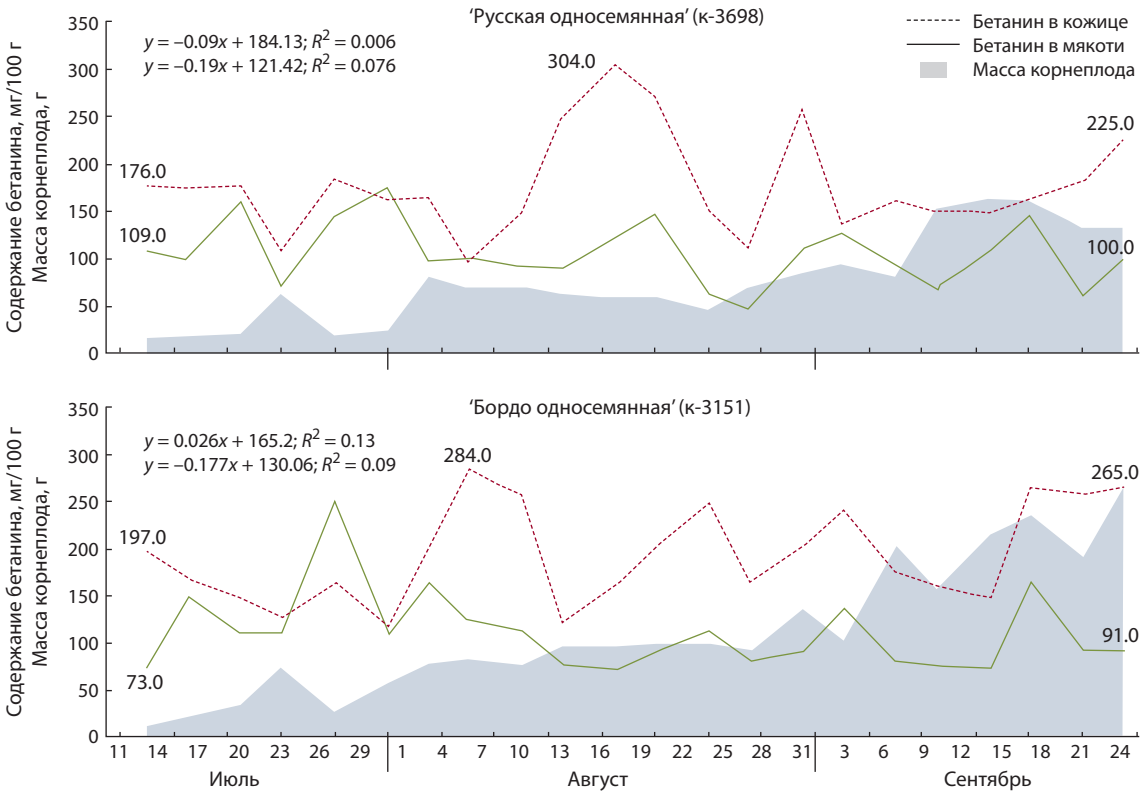

Рис. 5. Изменения содержания бетанина и массы корнеплода у сортов столовой свеклы ‘Русская односемянная’ и ‘Бордо односемянная’.

Таблица 2. Метрические параметры листовой поверхности опытных образцов столовой свеклы на момент уборки урожая

Метрический параметр	‘Бордо односемянная’, к-3151	‘Русская односемянная’, к-3698
Лист		
Количество, шт.	14	12
Длина, см	15	11
Ширина, см	6	5
Площадь одного листа, см^2	67.5	41.2
Площадь листовой поверхности, см^2	945.0	494.2
Длина черешка, см	14	12

результаты проведенного ранее эколого-географического изучения (Соколова, 2019). При этом размах колебания в отдельные периоды развития статистически значим ($p < 0.05$). Динамика имела волновой характер и достаточно синхронный рисунок у обоих сортов как в кожице, так и в мякоти корнеплодов. Можно заметить, что резкие восходящие движения содержания бетанина и нарастание массы корнеплодов часто носили разнонаправленный характер. Причем содержание пигмента в мякоти изменялось более консервативно, чем в кожице.

Известно, что путь биосинтеза бетанина достаточно гибкий и подвержен сильному влиянию экзогенных факторов (Tzin, Galili, 2010; Cabanes et al., 2014; Sakuta, 2014; Esatbeyoglu et al., 2015). Единожды за всю вегетацию было отмечено превышение содержания бетанина в мякоти над кожицей у обоих сортов (период с 27 по 31 июля). При этом зафиксировано максимальное его содержание в мякоти за всю вегетацию. Обильные продолжительные осадки, установившиеся с 21 июля, на фоне среднедневных температур воздуха выше +15 °C вызвали угнетение роста корнеплодов, что, скорее всего, и привело к увеличению содержания бетанина в мякоти.

В отличие от содержания пигмента, нарастание биомассы корнеплода было положительно взаимосвязано с продолжительностью вегетационного периода ($R^2 = 0.76$–0.86).

Активность фотосинтеза и, как следствие, метаболизма растений связана с площадью поверхности листовой биомассы растения. Образец ‘Русская односемянная’ отличался мелкими пигментированными и слегка волнистыми листовыми пластинками с более короткими черешками (табл. 2, рис. 6). Количество листьев на растении меньше, чем у образца ‘Бордо односемянная’. Площадь листовой поверхности на момент уборки у образца ‘Русская односемянная’ составила 494.2 см^2, что почти в два раза меньше, чем у образца ‘Бордо односемянная’. Эти характеристики имеют значение для понимания различий в реакции сортов на абиотические факторы среды.

Среднедневная температура воздуха и количество осадков – два наиболее влиятельных, постоянно колеблющихся экзогенных фактора. Столовая свекла достаточно пластичная культура, способная давать урожай как в южных

Рис. 6. Анатомо-морфологическое строение и вид полевых посевов опытных образцов столовой свеклы ‘Русская односемянная’ (к-3698) и ‘Бордо односемянная’ (к-3151).

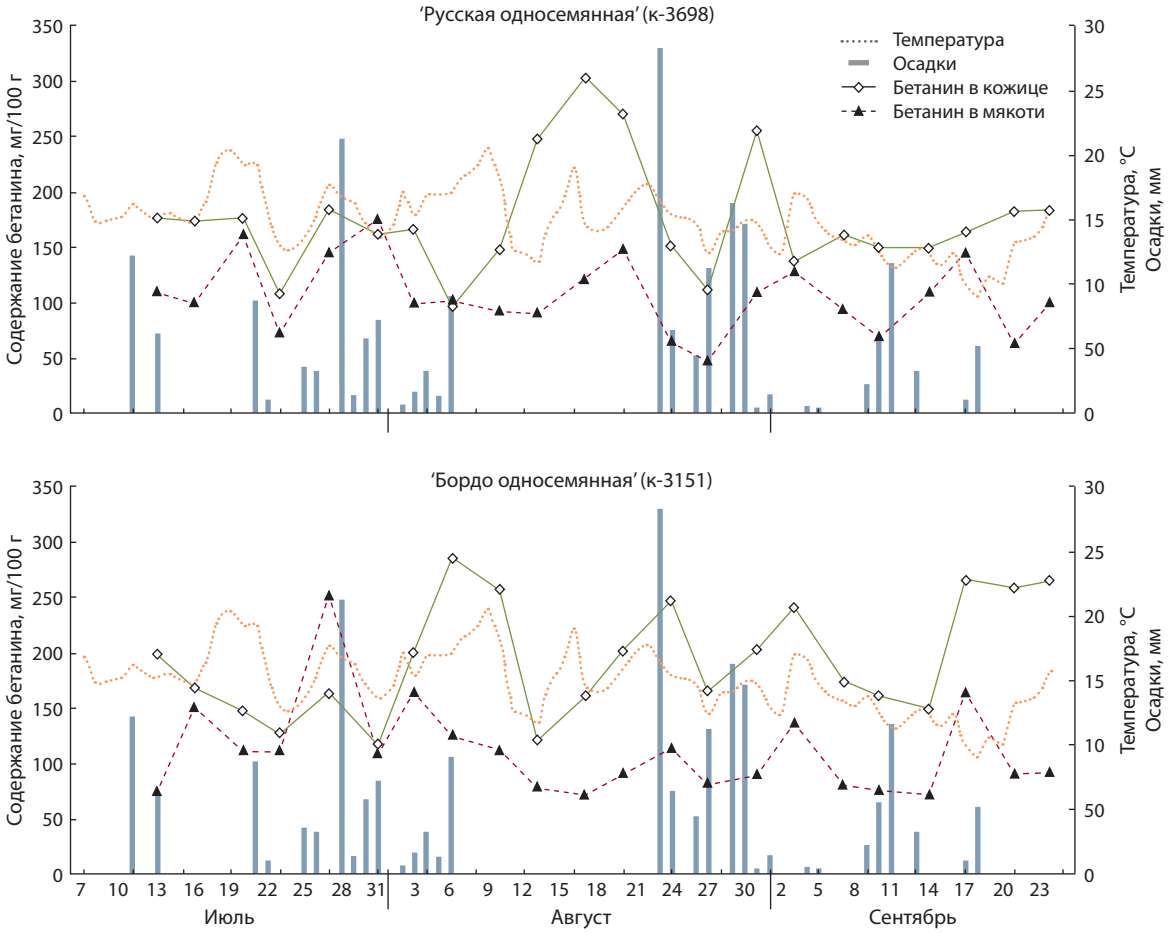

Рис. 7. Изменение содержания бетанина у сортов столовой свеклы 'Русская односемянная' и 'Бордо односемянная' в зависимости от характеристик погодных условий.

регионах Российской Федерации, так и в условиях северного региона (Буренин и др., 2013). Именно это качество обеспечило широкое ее распространение. Исследование выявило, что высокая пластичность генотипа – ценное свойство, позволяющее культуре благополучно переносить неблагоприятные периоды. На рис. 7 приведены изменения осадков, температуры воздуха и содержания пигмента в течение лета 2020 года. Вегетационный период характеризовался двумя стрессовыми периодами с полным отсутствием осадков – с 14 по 20 июля и с 7 по 22 августа, а также двумя периодами затяжных дождей – с 21 июля по 6 августа и с 23 августа по 1 сентября. За один день 28 июля и 23 августа выпало значительное количество осадков (21.2 и 28.2 мм соответственно), которые продолжались с меньшей интенсивностью еще на протяжении девяти дней. Это негативно отразилось на содержании бетанина в кожице и мякоти. В целом тенденция у сортов схожа, но имеются некоторые различия. Прослеживается также «отставание» реакции сорта 'Русская односемянная' на 7–10 дней (см. рис. 7).

Для выяснения взаимосвязей между изучаемыми параметрами был проведен корреляционный анализ сортов в динамике (сдвиг параметров среды на три и шесть дней) (табл. 3). Для обоих сортов характерна умеренная отрицательная корреляция между массой корнеплода и температурой воздуха, которая сохранялась на протяжении шести дней. Повышенная температура усиливала транспирацию растений, вызывая остановку нарастания корнеплода и увеличивая содержание пигмента в мякоти ($r = 0.32–0.31$). Через три дня эффект повышения концентрации пигмента в ответ на температуру уже не проявлялся.

Содержание бетанина в кожице тоже отрицательно коррелировало с повышением температуры воздуха, причем эффект проявлялся не сразу, а на третьи сутки. Для сорта 'Бордо односемянная' корреляция сохранялась до шестого дня ($r = –0.48$).

Для осадков в целом были характерны слабые отрицательные взаимосвязи со всеми изучаемыми признаками. Они имели слабую корреляцию с содержанием пигмента ($r < 0.3$). Биосинтез бетанина в кожице у сорта 'Русская односемянная' негативно реагировал на выпадение осадков ($r = –0.48$). Но уже через три дня растения адаптировались и взаимосвязь не проявлялась. Различия в реакции сортов, возможно, объясняются разницей в площади фотосинтетической поверхности генотипов.

Определение структуры взаимосвязей между изученными параметрами (PCA) выявило два неравновесных фактора (рис. 8). Компоненты факторов 1 и 2 объясняют вместе 87 % общей дисперсии: 32.6 и 54.4 % соответственно. Фактор 1 включил в себя основной параметр продук-

Таблица 3. Корреляционная матрица содержания бетанина, массы корнеплода и погодных характеристик опытных образцов столовой свеклы

Показатель	Масса корнеплода	Бетанин в кожице	Бетанин в мякоти
В день забора корнеплодов			
Температура	**–0.50/–0.47***	0.02/0.27	**0.32/0.31**
Осадки	–0.16/–0.23	**–0.48**/0.05	–0.26/–0.16
Масса корнеплода		–0.08/**0.36**	–0.28/–0.30
Бетанин в кожице			**0.31**/0.15
Через три дня			
Температура	**–0.47/–0.39**	**–0.34/–0.35**	–0.07/–0.10
Осадки	–0.14/–0.26	–0.05/0.08	–0.19/–0.12
Масса корнеплода		–0.08/**0.36**	–0.28/–0.30
Бетанин в кожице			**0.31**/0.15
Через шесть дней			
Температура	**–0.40/–0.54**	0.10/**–0.48**	–0.13/0.21
Осадки	–0.12/–0.17	–0.01/0.12	0.17/0.19
Масса корнеплода		–0.08/**0.36**	–0.28/–0.30
Бетанин в кожице			**0.31**/0.15

* ‘Русская односемянная’ / ‘Бордо односемянная’.

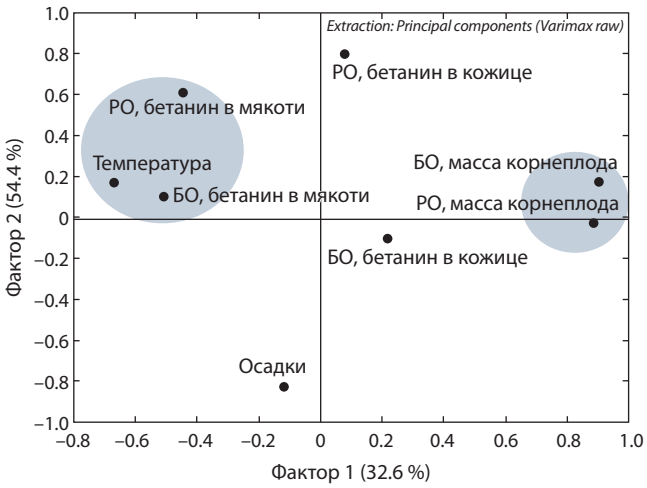

Рис. 8. Вклад основных компонентов факторного анализа в общую дисперсию.

РО – сорт ‘Русская односемянная’; БО – ‘Бордо односемянная’.

тивности – массу одного корнеплода. Фактор 2 объединил параметры «температура воздуха» и «бетанин в мякоти», подтверждая результаты корреляционного анализа. Параметры фактора 2 имели наиболее тесную взаимосвязь, т. е. на их долю приходилась бóльшая часть дисперсии. При этом другие переменные также имели достаточно высокую дисперсию, что говорит о значительном вкладе каждого из них. Таким образом, можно сделать вывод, что процесс биосинтеза бетанина у столовой свеклы очень гибкий и находится под сильным влиянием факторов внешней среды.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что в течение вегетации аккумуляции бетанина у столовой свеклы не происходило. Содержание пигмента было связано в первую очередь с исходным генотипом образца. Среднее значение бетанина в изученных коллекционных образцах составило: в кожице – 116.9 мг/100 г, в мякоти – 58.9 мг/100 г. Содержание пигмента в кожице у всех образцов превышало его содержание в мякоти. При положительной корреляции этих показателей (r = 0.74) увеличение интервала между ними зависело именно от бетанина в кожице (r = 0.86).

Содержание пигмента подвержено значительному колебанию в течение вегетации. Активность метаболических процессов, зависящая от фотосинтетической поверхности растений, имела большое значение для реакции генотипов столовой свеклы на различные факторы среды.

Процесс биосинтеза пигмента крайне чувствителен к погодным условиям, особенно к температуре воздуха. Увеличение бетанина в кожице в ответ на повышение температуры воздуха проявлялось на третьи сутки. Увеличение массы одного корнеплода отрицательно коррелировало с уровнем бетанина в мякоти, который, в свою очередь, тесно связан с температурой окружающего воздуха.

Наиболее подходящими для целей селекции на повышенное содержание бетанина являются округлые и плоскоокруглые сортотипы столовой свеклы. Для получения максимального выхода бетанина лучше подходят некрупные корнеплоды. При их выращивании рекомендуется использовать более загущенные схемы посадки или более раннюю уборку урожая, а также подбирать оптимальные сроки. При выборе конкретной даты уборки необходимо ориентироваться на характеристики погодных условий. Для выделения красителя рекомендуются отечественные сорта столовой свеклы ‘Бордо односемянная’ (к-3151) и ‘Русская односемянная’ (к-3698), дающие при благоприятных условиях высокий выход бетанина.

Список литературы / References

Бурак А.Д., Завалей А.П. Влияние способа обработки свеклы столовой на антиоксидантную активность сока и фруктово-овощных соков. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2020;4:51-61.
[Burak L.Ch., Zavaley A.P. Influence of the method of processing table beets on the antioxidant activity of beetroot and mixed juices. *Tekhnologii Pishchevoy i Pererabatyvayushchey Promyshlennosti APK – Produkty Zdorovogo Pitaniya = Technologies of Food and Processing Industry of AIC: Healthy Food*. 2020;4:51-61. (in Russian)]

Буренин В.И., Соколова Д.В., Емельянов А.В. Изменчивость количественных признаков сортообразцов столовой свеклы при эколого-географическом изучении. *Сахар. свекла*. 2013;8:16-19.
[Burenin V.I., Sokolova D.V., Emelyanov A.V. Variability of quantitative traits of red beet varieties in an ecogeographical study. *Sakharnaya Svekla = Sugar Beet*. 2013;8:16-19. (in Russian)]

Изучение и поддержание мировой коллекции корнеплодов: (Свекла, репа, турнепс, брюква). Методические указания. Под ред. В.И. Буренина. Л.: ВИР, 1989.
[Burenin V.I. (Ed.). Methodological Guidelines for the Study and Maintenance of the World Collection of Root Crops. Leningrad: VIR Publ., 1989. (in Russian)]

Мглинец А.В., Осипова З.А. Генетический контроль формирования окраски корнеплода у кормовой свеклы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2010;14(4):720-728.
[Mglinets A.V., Osipova Z.A. Formation of root color and its genetic control in fodder beet. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2010;14(4):720-728. (in Russian)]

Соколова Д.В. Оценка взаимодействия генотип-среда у сортов свеклы столовой коллекции ВИР. *Овощи России*. 2018;6:26-30. DOI 10.18619/2072-9146-2018-6-26-30.
[Sokolova D.V. The evaluation of genotype-environment interaction in red beet varieties of VIR collection. *Ovoshchi Rossii = Vegetable Crops of Russia.* 2018;6:26-30. DOI 10.18619/2072-9146-2018-6-26-30. (in Russian)]

Соколова Д.В. Эколого-географическое изучение накопления бетанина у перспективных образцов столовой свеклы коллекции ВИР. *Труды по прикл. 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. *Trudy po Prikladnoy Botanike, Genetike i Selektsii = Proceedings on Applied Botany, Genetics, and Breeding*. 2019;180(4):66-74. DOI 10.30901/2227-8834-2019-4-66-74. (in Russian)]

Соколова Д.В., Соловьева А.Е. Перспективный исходный материал для селекции сортов свеклы с высоким содержанием бетанина. *Аграр. Россия*. 2019;8:26-32. DOI 10.30906/1999-5636-2019-8-26-32.
[Sokolova D.V., Solovieva A.E. Promising starting material for selection of beet varieties with a high content of betanin. *Agrarnaya Rossiya = Agricultural Russia.* 2019;8:26-32. DOI 10.30906/1999-5636-2019-8-26-32. (in Russian)]

Фролов В.Л., Чижик Ю.Л. Способ получения пищевого красителя из свеклы. Пат. на изобретение. RU 2081136 C1. Опубл. 10.06.1997.
[Frolov V.L., Chizhik Ju.L. Method of Preparing Food Dye from Beet. Invention patent. RU 2081136 C1. Publ. 10.06.1997. (in Russian)]

Юдина Р.С., Гордеева Е.И., Шоева О.Ю., Тихонова М.А., Хлесткина Е.К. Антоцианы как компоненты функционального питания. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(2):178-189. DOI 10.18699/VJ21.022.
[Yudina R.S., Gordeeva E.I., Shoeva O.Y., Tikhonova M.A., Khlestkina E.K. Anthocyanins as functional food components. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(2):178-189. DOI 10.18699/VJ21.022. (in Russian)]

Azeredo H.M.C., Pereira A.C., de Souza A.C.R., Gouveia S.T., Mendes K.C.B. Study on efficiency of betacyanin extraction from red beetroots. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2009;44(12):2464-2469. DOI 10.1111/j.1365-2621.2009.02037.x.

Aztatzi-Rugerio L., Granados-Balbuena S.Y., Zainos-Cuapio Y., Ocaranza-Sánchez E., Rojas-López M. Analysis of the degradation of betanin obtained from beetroot using Fourier transform infrared spectroscopy. *J. Food Sci. Technol*. 2019;56(8):3677-3686. DOI 10.1007/s13197-019-03826-2.

Cabanes J., Gandia-Herrero F., Escribano J., Garcia-Carmona F., Jimenez-Atienzar M. One-step synthesis of betalains using a novel betalamic acid derivatized support. *J. Agric. Food Chem*. 2014; 62(17):3776-3782. DOI 10.1021/jf500506y.

Cai Y., Sun M., Wu H., Huang R., Corke H. Characterization and quantification of betacyanin pigments from diverse *Amaranthus* species. *J. Agric. Food Chem*. 1998;46(6):2063-2070. DOI 10.1021/jf9709966.

Castellanos-Santiago E., Yahia E.M. Identification and quantification of betalains from the fruits of 10 Mexican prickly pear cultivars by high-performance liquid chromatography and electrospray ionization mass spectrometry. *J. Agric. Food Chem*. 2008;56(14):5758-5764. DOI 10.1021/jf800362t.

Esatbeyoglu T., Wagner A.E., Schini-Kerth V.B., Rimbach G. Betanin – a food colorant with biological activity. *Mol. Nutr. Food Res*. 2015; 59(1):36-47. DOI 10.1002/mnfr.201400484.

Herbach K.M., Stintzing F.C., Carle R. Stability and color changes of thermally treated betanin, phyllocactin, and hylocerenin solutions. *J. Agric. Food Chem*. 2006;54(2):390-398. DOI 10.1021/jf051854b.

Jiratanan T., Liu R.H. Antioxidant activity of processed table beets (*Beta vulgaris* var. *conditiva*) and green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Agric. Food Chem*. 2004;52(9):2659-2670. DOI 10.1021/jf034861d.

Nemzer B., Pietrzkowski Z., Spórna A., Stalica P., Thresher W., Michałowski T., Wybranie S. Betalainic and nutritional profiles of pigment-enriched red beet root (*Beta vulgaris* L.) dried extracts. *Food Chem*. 2011;127(1):42-53. DOI 10.1016/j.foodchem.2010.12.081.

Nilsson T. Studies into the pigments in beetroot (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *rubra* L.). *Lantbrukhogskolans Annaler*. 1970;36: 179-219.

Saguy I. Thermostability of red beet pigments (betanine and vulgaxanthin-I): influence of pH and temperature. *J. Food Sci*. 1979;44(5): 1554-1555. DOI 10.1111/j.1365-2621.1979.tb06488.x.

Saguy I., Kopelman I.J., Mizrahi S. Thermal kinetic degradation of betanin and betalamic acid. *J. Agric. Food Chem*. 1978;26(2):360-362. DOI 10.1021/jf60216a052.

Sakuta M. Diversity in plant red pigments: anthocyanins and betacyanins. *Plant Biotechnol Rep*. 2014;8:37-48. DOI 10.1007/s11816-013-0294-z.

Sawicki T., Bączek N., Wiczkowski W. Betalain profile, content and antioxidant capacity of red beetroot dependent on the genotype and root part. *J. Funct. Foods*. 2016;27:249-261. DOI 10.1016/j.jff.2016.09.004.

Schliemann W., Strack D. Intramolecular stabilization of acylated betacyanins. *Phytochemistry*. 1998;49(2):585-588. DOI 10.1016/S0031-9422(98)00047-8.

Stintzing F.C., Carle R. Betalains – emerging prospects for food scientists. *Trends Food Sci. Technol*. 2007;18(10):514-525. DOI 10.1016/j.tifs.2007.04.012.

Stintzing F.C., Schieber A., Carle R. Rote Bete als färbendes Lebensmittel – eine Bestandsaufnahme. *Obst- Gemüse- Kartoffelverarb*. 2000;85:196-204.

Tesoriere L., Allegra M., Butera D., Livrea M.A. Absorption, excretion, and distribution of dietary antioxidant betalains in LDLs: potential health effects of betalains in humans. *Am. J. Clin. Nutr*. 2004;80(4): 941-945. DOI 10.1093/ajcn/80.4.941.

Tzin V., Galili G. New insights into the shikimate and aromatic amino acids biosynthesis pathways in plants. *Mol. Plant*. 2010;3(6):956-972. DOI 10.1093/mp/ssq048.

von Elbe J.H. Betalains. *Curr. Protoc. Food Anal. Chem*. 2001;F3.1.1–F3.1.7. DOI 10.1002/0471142913.faf0301s00.

Vulić J.J., Ćebović T.N., Čanadanović V.M., Ćetković 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.

ORCID ID
D.V. Sokolova orcid.org/0000-0002-9967-7454

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Поступила в редакцию 19.07.2021. После доработки 10.10.2021. Принята к публикации 18.11.2021.