УДК 635.567:577.11:631.588.5 DOI: 10.25695/AGRPH.2024.02.04

ОЦЕНКА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ И БИОХИМИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ РУКОЛЫ (*ERUCA SATIVA* L.) ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ В КОНТРОЛИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ СВЕТОКУЛЬТУРЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОТОПЕРИОДАХ

О. А. Громова[1], Е. М. Эзерина[1], А. Е. Соловьева[2], Н. В. Кочерина[1], А. М. Улимбашев[3], Ю. В. Чесноков[1]

[1]ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
Санкт-Петербург, Гражданский просп., д. 14,
E-mail: gromova@agrophys.ru, lehzerina@yandex.ru;
[2]ФГБНУ ФИЦ ВИР им. Н.И. Вавилова,
Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 42-44;
[3]ФГБОУ ВО СПбГАУ,
Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское ш., д. 2

Поступила в редакцию 25.03.2024, принята к печати 01.06.2024

В контролируемых условиях интенсивной светокультуры было изучено 16 образцов руколы (*Eruca sativa* L.), исследована реакция сортов на длительность фотопериода (12, 14 и 16 часов), проанализирована корреляционная связь между морфологическими признаками и биохимическими показателями. Двухфакторный дисперсионный анализ выявил наличие изменчивости среди генотипов по большинству признаков, а также высокую отзывчивость культуры на изменение продолжительности светового периода. По ряду хозяйственно ценных морфологических признаков 14-ти часовой фотопериод был определен как наиболее благоприятный для выращивания исследованных сортов руколы в условиях интенсивной светокультуры. При помощи коэффициентов корреляции установлены постоянные средние обратные (от –0,7 до –0,5) и тесные обратные (от –0,91 до –0,73) связи между содержанием сухого вещества и хозяйственно ценными морфологическими признаками. Наиболее значимые корреляционные связи выявлены с признаками «сырая масса» (от –0,86 до –0,84) и «количество листьев» (от –0,74 до –0,67). Также было выявлено множество взаимосвязей между содержанием каротиноидов, хлорофиллов, β-каротина и рядом морфологических признаков, проявление которых варьировалось в зависимости от продолжительности фотопериода. По совокупности морфологических признаков и биохимических показателей выделены образцы руколы к-3 и к-8, отличающиеся высокой продуктивностью и ценным биохимическим составом.

Ключевые слова: рукола, морфологические показатели, хозяйственно ценные признаки, корреляционные связи, биохимические показатели.

ASSESSMENT OF MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF ROCKET (*ERUCA SATIVA* L.) WHEN GROWING IN CONTROLLED CONDITIONS UNDER DIFFERENT PHOTOPERIODS

O. A. Gromova[1], E. M. Ezerina[1], A. E. Solovyeva[2], N. V. Kocherina[1], A. M. Ulimbashev[3], Yu. V. Chesnokov[1]

[1] Agrophysical Research Institute
14, Grazhdanskiy pr., St. Petersburg, 195220, Russia
E-mail: gromova@agrophys.ru, lehzerina@yandex.ru;
[2] Federal Research Center Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources
42-44, Bol'shaya Morskaya St., St. Petersburg, 190000, Russia;
[3] Saint-Petersburg State Agrarian University
2, Petersburgskoye hihgway, Pushkin, 196601, Russia

Under controlled conditions of intensive light culture, 16 samples of rocket (*Eruca sativa* L.) and the response of the varieties to the duration of the photoperiod (12, 14, 16 hours) were studied; the correlation between morphological characteristics and biochemical parameters was analyzed. Two-way analysis of variance revealed the presence of variability among genotypes for most of the traits, as well as the high responsiveness of the crop to changes in the photoperiod duration. Based on a number of economically valuable morphological traits, a 14-hour photoperiod was determined as the most favorable photoperiod for growing the studied rocket varieties under conditions of intensive light culture. Using correlation coefficients, constant average inverse (from –0,7 to –0,5) and close inverse (from –0,91 to –0,73) relationships were established between the percentage of dry matter content and the economically valuable morphological traits. The most significant correlations were identified with the traits «weight» (from –0,86 to –0,84) and «number of leaves» (from –0,74 to –0,67). Many relationships were also identified between the content of carotenoids, chlorophylls, β-carotene and a number of morphological characters, the manifestation of which varied depending on the duration of the photoperiod. Based on a combination of morphological characteristics and biochemical parameters, rocket samples k-3 and k-8, characterized by high productivity and valuable biochemical composition, were identified.

Key words: rocket, morphological indicators, economically valuable traits, correlations, biochemical parameters.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач сельскохозяйственной отрасли является круглогодичное получение качественной овощной продукции. Климат России не позволяет избежать сезонности производства овощей в открытом грунте – до 90% овощной продукции поступает к потребителям в августе-сентябре. Однако для качественного и сбалансированного питания населения необходимо, чтобы поступление овощей было равномерным в течение всего года. Для преодоления сезонности потребления овощей и продуктов их переработки весьма эффективны активно развивающиеся в настоящее время технологии производства растительной продукции в условиях интенсивной светокультуры, дающие возможность растениям реализовать свой потенциал продуктивности в полностью контролируемых условиях среды при использовании оптимальных режимов выращивания. Это происходит за счет удовлетворения всех основных потребностей растений и исключения стрессовых факторов, влияющих на их рост и развитие. Интенсивная светокультура открывает новые перспективы для производства овощной продукции в регионах, где оно ограничено или невозможно ввиду климатических условий (Панова и др., 2023).

Рукола (*Eruca sativa* L.) – это перспективная зеленная культура семейства капустные, традиционный ингредиент кухни стран Средиземноморского региона, откуда данная культура пришла в Россию. Рукола ценится благодаря высокому содержанию витаминов: β-каротина – 14,24 мг кг$^{-1}$, витамина А – 1,19 мг кг$^{-1}$, витамина В1 (тиамин) – 0,44 мг кг$^{-1}$, витамина В2 (рибофлавин) – 0,86 мг кг$^{-1}$, витамина В3 (пантотеновая кислота) – 4,37 мг кг$^{-1}$, витамина В4 (холин) – 153 мг кг$^{-1}$, витамина В6 (пиридоксин) – 0,73 мг кг$^{-1}$, витамина В9 (фолиевая кислота) – 0,97 мг кг$^{-1}$, витамина С (аскорбиновая кислота) – 150 мг кг$^{-1}$, витамина Е (токоферол) – 4,3 мг кг$^{-1}$, витамина К (филлохинон) – 1,09 мг кг$^{-1}$, витамина РР (ниациновый эквивалент) – 3,05 мг кг$^{-1}$, а также биоактивных компонентов – глюкозинолатов, фенолов и ненасыщенных жирных кислот (Sut et al., 2018). Так же, как и многие другие представители семейства капустные, она отличается высоким содержанием биологически активных веществ – ферментов и пигментов (Соловьева, Артемьева, 2012). Кроме того, рукола, как и многие другие зеленные культуры, имеет короткий период вегетации, что позволяет получать от 12 до 20 урожаев в год при выращивании в интенсивной светокультуре (Хаустова, 2015).

Рукола является одной из наиболее исследуемых в последние десятилетия культур. Так, например, проведены исследования по изучению качества и продуктивности руколы при выращивании на субстратах различного состава (Пухальская, 2022), а также с применением различных удобрений (биологических и промышленных) (Бербеков, Езаов, 2015; Максименко, Меньшикова, 2019). Кроме того, изучались антиоксидантные свойства руколы (Гинс и др., 2015), энергия прорастания и лабораторная всхожесть зеленных культур семейства капустные в зависимости от качества семян (Кондратенко и др., 2022) и влияние различных конструкций систем обогрева на растения руколы (Серов, Лебедев, 2019).

Хотя ранее было проведено исследование влияния различных режимов освещения на фотосинтетические характеристики руколы при сочетании факторов интенсивности света, его качественного состава и фотопериода (Elmardy et al., 2021), до настоящего времени не осуществлено ни одного исследования, направленного на выявление зависимости проявления морфологических признаков от длины светового дня в условиях интенсивной светокультуры у разных сортов руколы, а также исследований, посвященных изучению взаимосвязи морфологических признаков и биохимических показателей данной культуры. Влияние фотопериода на качество и урожайность различных сортов руколы при выращивании на гидропонных установках проточного типа также не изучалось.

Целью данной работы являлась оценка влияния продолжительности светового дня на урожайность и качество различных сортов руколы в условиях интенсивной светокультуры, а также изучение сопряженности морфологических и биохимических признаков путем установления статистических корреляций для оптимизации производства в светокультуре.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлись 16 образцов руколы (табл. 1) различного происхождения (Россия, Франция, Греция, США, Австрия) из коллекции ВИР (ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова). Растения выращивались на агробиополигоне ФГБНУ АФИ методом проточной гидропоники при трех световых режимах: 12, 14 и 16 часов. В качестве источника света использовались газоразрядные зеркализированные натриевые лампы ДНаЗ-400 (производитель – ООО «Рефлакс», Россия), освещенность составляла 17,5±2,5 кЛк. В качестве субстрата использовался грунт на основе торфа «Агробалт-С» (ООО «Пиндструп», Россия) с добавлением мела (5 г л$^{-1}$) и глины (50 г л$^{-1}$). В качестве раствора для проточной гидропоники использовался модифицированный раствор Кнопа: $Ca(NO_3)_2$ – 0,94 г л$^{-1}$, KNO_2 – 0,23 г л$^{-1}$, KH_2PO_4 – 0,25 г л$^{-1}$, $MgSO_4$ – 0,25 г л$^{-1}$, $MgCl_2$ – 0,08 г л$^{-1}$, NH_4NO_3 – 0,07 г л$^{-1}$, $Fe(NH_4)_3(C_6H_5O_7)_2$ – 0,0087 г л$^{-1}$, H_3BO_3 – 0,0029 г л$^{-1}$, $MnSO_4*5H_2O$ – 0,0019 г л$^{-1}$, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,0002 г л$^{-1}$, $CuSO_4*5H_2O$ – 0,0002 г л$^{-1}$. Температурный режим поддерживался на уровне +22°С (день) / +20°С (ночь).

Таблица 1. Список образцов руколы (*Eruca sativa* L.)

№ каталога	Название	Происхождение
к-3	–	Греция
к-4	Rocket	США
к-7	–	Франция
к-8	–	Франция
к-12	Пикантная	Россия
к-16	–	Австрия
к-17	Широколистный	Россия
к-18	Гурман	Россия
к-19	–	Россия
к-20	С крупным листом	Россия
к-21	Кореянка	Россия
к-22	Оливетта	Россия
к-24	Деликатесная	Россия
к-28	Ореховая	Россия
к-29	Сицилия	Россия
к-33	Аромат	Россия

Растения выращивались в горшках для салатной линии (объемом 0,1 л), в каждый из них высаживалось по шесть растений с дальнейшим прореживанием до трёх растений на горшок в фазу первого настоящего листа.

Повторность опыта – трехкратная, размер анализируемой выборки – 16 растений. Морфологическое описание растений руколы по 24-м признакам проводилось в фазу технической спелости на 23-й день от посева в соответствии с методиками ФГБУ «Госсорткомиссии» - RTG/02485/1; RTG/01/3 (Методики испытаний на ООС).

Биохимический анализ содержания в листьях сухого вещества и пигментов (хлорофиллов и каротиноидов (витамин А)) проводился в биохимической лаборатории ВИР также на 23-й день от посева. Содержание сухого вещества определялось гравиметрическим методом (Ермаков, 1987). Каротиноиды и хлорофиллы экстрагировались с помощью ацетона с дальнейшим измерением абсорбции спектрофотометром Ultrospec II на различных длинах волн (нм): 645, 662 – для хлорофиллов *a* и *b*, 440 – для каротиноидов, 454 – для каротинов, 454 – для β-каротина, 447 – для лютеина, 440 – для виолоксантина и 443 – для ксантофилла (Ермаков, 1987; Артемьева, Соловьева, 2023). Данные о биохимическом составе растений представлены в пересчете на абсолютно сухое вещество.

Для комплексной оценки сравниваемых средних значений морфологических признаков при разных фотопериодах проводился двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA. Статистический анализ выполнялся с использованием программы STATISTICA v.12.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

К наиболее важным хозяйственно ценным признакам зеленных культур относятся признаки, характеризующие рост растения (диаметр розетки, высота растения, количество листьев, масса, габитус), а также площадь и поверхность листовой пластинки (длина и ширина пластинки, окраска, опушение). Для корректной статистической обработки некоторые морфологические признаки были представлены в балльной системе, где увеличение значения подразумевает большую интенсивность проявления признака. При выращивании 16-ти образцов руколы в условиях исследуемых фотопериодов была отмечена значительная вариабельность проявления изучаемых хозяйственно ценных морфологических признаков.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что влияние факторов (генотип и фотопериод) статистически значимо для всех исследуемых морфологических признаков, за исключением габитуса – данный признак достоверно не изменяется при выращивании растений в условиях различных фотопериодов (12, 14 и 16 часов). Также выявлена значимость межфакторного взаимодействия – совместного воздействия факторов, которое также было статистически значимым (уровень значимости $p < 0,05$) (табл. 2).

Таблица 2. Вклад генотипа и фотопериода в общую дисперсию морфологических признаков образцов руколы при $p \leq 0,05$

Признаки	Факторы	d.f.	MS	F	p
Диаметр розетки	Ф	1	578,61	89,59	0,000
	Г	14	579,11	89,67	0,000
	Ф*Г	29	70,67	10,94	0,000
	ошибка	1421	6,46	–	–
Высота розетки	Ф	1	233,82	84,80	0,000
	Г	14	94,02	34,10	0,000
	Ф*Г	29	42,50	15,41	0,000
	ошибка	1421	2,76	–	–
Габитус	Ф	1	1,60	2,59	**0,108**
	Г	14	10,94	17,67	0,000
	Ф*Г	29	10,95	17,68	0,000
	ошибка	1421	0,62	–	–
Количество листьев	Ф	1	47,61	85,09	0,000
	Г	14	58,93	105,33	0,000
	Ф*Г	29	3,24	5,79	0,000
	ошибка	1420	0,56	–	–
Масса растения	Ф	1	286,80	164,57	0,000
	Г	14	173,20	99,38	0,000
	Ф*Г	29	13,18	7,56	0,000
	ошибка	1420	1,74		
Длина пластинки	Ф	1	109,92	56,37	0,000
	Г	14	90,84	46,59	0,000
	Ф*Г	29	39,11	20,05	0,000
	ошибка	1420	1,95		
Ширина пластинки	Ф	1	64,00	129,74	0,000
	Г	14	35,35	71,65	0,000
	Ф*Г	29	7,53	15,27	0,000
	ошибка	1420	0,49	–	–
Окраска пластинки	Ф	1	18,14	23,26	0,000
	Г	14	19,98	25,61	0,000
	Ф*Г	29	41,23	52,86	0,000
	ошибка	1418	0,78	–	–
Опушение пластинки	Ф	1	11,21	18,56	0,000
	Г	14	3,65	6,04	0,000
	Ф*Г	29	2,24	3,71	0,000
	ошибка	1413	0,60	–	–

Примечание: полужирный шрифт – значение недостоверно при $p \leq 0,05$; Г – генотип, Ф – фотопериод, Ф*Г – совместное действие факторов «генотип» и «фотопериод».

Полученные данные свидетельствуют о наличии достаточной изменчивости среди генотипов по большинству изученных признаков, а также о высокой отзывчивости культуры на изменение фотопериода. Для большинства исследованных образцов (9 из 16-ти) наиболее благоприятным для выращивания в светокультуре оказался фотопериод 14 часов (рис.), при котором отмечены наиболее высокие значения исследуемых количественных хозяйственно ценных признаков (масса, диаметр, высота растения, количество листьев, длина и ширина пластинки). Полученные результаты дополняют данные ранее опубликованных исследований, посвященных изучению влияния длительности фотопериода на зеленные культуры. Реакция на изменение длины фотопериода может отличаться у разных культур, в том числе при воздействии других факторов среды. Так, увеличение длительности фотопериода приводило к увеличению количества листьев и биомассы салата-латука (положительно коррелировало с данными признаками) (Shen et al., 2014; Song et al., 2020). Согласно G. Pennisi с соавт., длина фотопериода не оказывала влияния на массу растений и площадь листьев руколы (Pennisi et al., 2020), в то время как N. A. Elmardy с соавт. отмечали увеличение высоты, диаметра стеблей и площади листьев растений руколы, выращенных при

фотопериодах продолжительностью менее 14 часов (Elmardy et al., 2021).

По совокупности морфологических признаков выделились несколько образцов – к-3, к-7, к-8, к-18 и к-28 (табл. 3). Масса остальных образцов была существенно ниже и составляла от 0,49±0,03 г до 4,42±0,56 г. Высокие значения массы у некоторых из данных образцов были обусловлены увеличением длины черешка, при этом средние значения остальных морфологических показателей были значительно ниже, чем у выделившихся образцов.

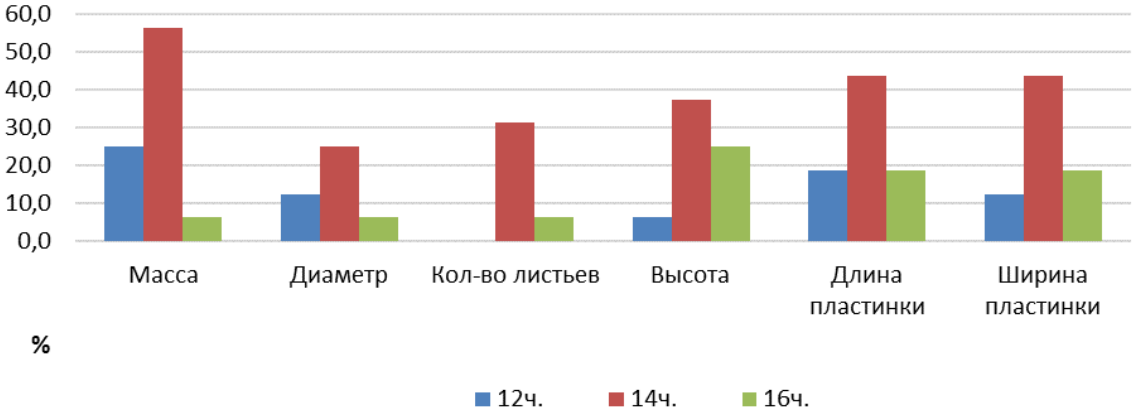

Рис. Доля образцов, морфологические признаки роста которых имели максимальные значения ($p \leq 0,05$), при различных фотопериодах (%)

Таблица 3. Средние значения морфологических показателей выделившихся образцов руколы, выращенных при 14-часовом фотопериоде

Образец	Диаметр розетки, см	Высота розетки, см	Масса растения, г	Длина пластинки, см	Ширина пластинки, см	Кол-во листьев, шт.
к3	16,80±0,63	11,65±0,38	4,62±0,32	9,01±0,28	4,54±0,15	6,43±0,17
к4	12,46±0,44	9,90±0,28	3,40±0,23	8,10±0,26	4,06±0,11	5,15±0,12
к7	14,24±0,48	11,02±0,26	5,72±0,40	8,22±0,24	4,14±0,12	4,81±0,12
к8	14,19±0,36	9,81±0,22	5,25±0,27	7,50±0,16	4,52±0,09	5,14±0,11
к18	13,61±0,41	9,74±0,30	4,65±0,23	6,96±0,20	3,77±0,08	5,57±0,11
к28	12,46±0,78	8,71±0,46	3,31±0,37	7,42±0,45	3,60±0,22	5,04±0,16

Содержание сухого вещества характеризует питательную ценность овощной продукции. В данном исследовании диапазон содержания сухого вещества увеличивался с возрастанием продолжительности светового дня. Он составлял от 6,96% до 16,21% при 12-часовом фотопериоде, от 7,68% до 20,24% – при 14-часовом и от 9,08% до 24,76% – при 16-часовом. Таким образом, при увеличении длины фотопериода содержание сухого вещества повышалось, что согласуется с результатами исследований, проведенных на проростках китайской капусты (Chen et al., 2021). Авторы связывают это с увеличением площади семядолей и уменьшением высоты растения. В настоящем исследовании при более продолжительном фотопериоде растения имели плотные, небольшие по размерам листья. Сходные результаты (уменьшение длины листовой пластинки и увеличение толщины листьев) были получены при исследовании влияния длительности фотопериода на растения салата-латука (Song et al., 2020).

Содержание зеленых пигментов значительно варьировалось у всех образцов при изменении длины фотопериода. Сумма хлорофиллов составляла от 606,4 мг кг$^{-1}$ до 1192,8 мг кг$^{-1}$ при 12-часовом периоде, от 541,3 мг кг$^{-1}$ до 1245,1 мг кг$^{-1}$ – при 14-часовом, от 461 мг кг$^{-1}$ до 1132,1 мг кг$^{-1}$ – при 16 часовом. У образцов к-3, к-19, к-24, к-28 и к-29 увеличение фотопериода приводило к снижению содержания хлорофиллов (сумма хлорофиллов, хлорофилл *a*, *b*), а у сортов к-7, к-8 и к-17, наоборот, – к накоплению. Для образцов к-20, к-21, к-22 и к-24 наиболее благоприятным для накопления хлорофиллов оказался 14-часовой фотопериод. У образцов к-16 и к-33 увеличение содержания хлорофиллов происходило при коротком и длинном фотопериодах (12 и 16 часов). Для образца к-4 не было выявлено связи между изменением продолжительности фотопериода и накоплением зеленых пигментов.

При исследуемых фотопериодах содержание каротиноидов составляло от 104,5 мг кг$^{-1}$ до 297,2 мг кг$^{-1}$ при 12-часовом периоде, от 46,8 мг кг$^{-1}$ до 195,8 мг кг$^{-1}$ – при 14-часовом, от 83,4 мг кг$^{-1}$ до 178,3 мг кг$^{-1}$ – при 16-часовом. Содержание β-каротина составляло от 28,7 мг кг$^{-1}$ до 52,5 мг кг$^{-1}$ при 12-часовом периоде, от 13 мг кг$^{-1}$ до 57,6 мг кг$^{-1}$ – при 14-часовом, от 20,7 мг кг$^{-1}$ до 48,9 мг кг$^{-1}$ – при 16 часовом.

Содержание β-каротина и каротиноидов с увеличением продолжительности фотопериода уменьшалось у образцов к-4 и к-8. Накопление указанных пигментов у образцов к-7, к-12, к-16, к-18, к-19, к-20, к-21, к-28 и к-33 происходило при коротком

и длинном фотопериодах, а у образцов к-3 и к-22 изменение продолжительности фотопериода не приводило к достоверным изменениям содержания каротиноидов и β-каротина. У образцов к-29 и к-17 накопление каротиноидов происходило при коротком и длинном фотопериодах, а β-каротина – при коротком фотопериоде у образца к-29 и длинном фотопериоде у образца к-17. У образца к-24 содержание β-каротина и каротиноидов было наиболее высоким при фотопериоде 14 часов.

Максимальные значения содержания сухого вещества при исследуемых фотопериодах были отмечены у образцов к-22 (от 16,2% до 20,77%), к-28 (от 10,88% до 24,7%) и к-29 (от 14,32% до 22,84%); каротиноидов – у образцов к-8 (от 146,5 мг кг$^{-1}$ до 275,3 мг кг$^{-1}$), к-4 (от 127,1 мг кг$^{-1}$ до 239,4 мг кг$^{-1}$), к-17 (от 162,6 мг кг$^{-1}$ до 202,8 мг кг$^{-1}$); хлорофиллов – у образцов к-21 (от 1036,6 мг кг$^{-1}$ до 1245,1 мг кг$^{-1}$), к-24 (от 845,3 мг кг$^{-1}$ до 1054,2 мг кг$^{-1}$); β-каротина – у образцов к-24 (от 39,22 мг кг$^{-1}$ до 57,65 мг кг$^{-1}$), к-8 (от 38,60 мг кг$^{-1}$ до 42,64 мг кг$^{-1}$) и к-21 (от 35,32 мг кг$^{-1}$ до 47,64 мг кг$^{-1}$).

Среди выделившихся по морфологическим признакам образцов наиболее высокие значения содержания сухого вещества, зеленых пигментов, каротиноидов и β-каротина были отмечены у образцов к-8 (от 6,96% до 9,08%; от 877,2 мг кг$^{-1}$ до 987 мг кг$^{-1}$; от 146,5 мг кг$^{-1}$ до 275,3 мг кг$^{-1}$; от 38,6 мг кг$^{-1}$ до 42,64 мг кг$^{-1}$ соответственно) и к-3 (от8% до 11,13%; от 461 мг кг$^{-1}$ до 879 мг кг$^{-1}$; от 94,3 мг кг$^{-1}$ до 235,8 мг кг$^{-1}$; от 20,65 мг кг$^{-1}$ до 37,4 мг кг$^{-1}$ соответственно).

Для каждого фотопериода и для всех образцов был проведен корреляционный анализ, позволивший определить силу связи между изученными морфологическими признаками и биохимическими показателями. Взаимосвязь между признаками у образцов руколы оценивалась при помощи коэффициента корреляции Пирсона. Для всех трех фотопериодов были выявлены постоянные тесные и средние обратные корреляционные связи между содержанием сухого вещества и морфологическими признаками, характеризующими рост растения, – диаметром розетки, количеством листьев на растении, массой растения, а также морфологическим признаком листа – шириной пластинки. Кроме того, были отмечены средние и тесные корреляционные связи между содержанием сухого вещества и морфологическими признаками, которые являлись достоверными только при менее благоприятных условиях (фотопериоды 12 и 16 часов) (табл. 4).

Связь между морфологическими признаками и содержанием пигментов также не была постоянной. Были выявлены тесные и средние корреляционные связи между общим содержанием каротиноидов и некоторыми морфологическими признаками (табл. 5).

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между морфологическими признаками и содержанием сухого вещества

Сухой вес, %	фотопериод, часы	Морфологические признаки							
		диаметр розетки	габитус	кол-во листьев	масса растения	число нормальных долей	число зачаточных долей	ширина пластинки	характер поверхности ткани пластинки
	12	**–0,70**	**–0,91**	**–0,73**	**–0,84**	**–0,59**	**–0,63**	**–0,77**	**–0,63**
	14	**–0,81**	–0,08	**–0,67**	**–0,84**	–0,44	–0,43	**–0,85**	**–0,68**
	16	**–0,83**	**0,71**	**–0,74**	**–0,86**	**–0,82**	**–0,90**	**–0,62**	0,04

Примечание: полужирный шрифт – корреляция между признаками достоверна при $p \leq 0,05$.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между морфологическими признаками и содержанием каротиноидов

Каротиноиды, мг 100 г$^{-1}$	фотопериод, часы	Морфологические признаки						
		диаметр розетки	кол-во листьев	масса растения	число нормальных долей	число зачаточных долей	ширина пластинки	окраска пластинки
	12	**0,70**	**0,74**	**0,83**	**0,63**	**0,64**	**0,69**	**-0,83**
	14	0,40	0,48	0,40	0,13	0,14	**0,52**	**0,59**
	16	**0,59**	**0,51**	**0,56**	**0,62**	**0,53**	0,27	0,28

Примечание: полужирный шрифт – корреляция между признаками достоверна при $p < 0,05$.

У образцов руколы, выращенных при фотопериоде 12 часов, была выявлена тесная прямая корреляционная связь между общим содержанием каротиноидов и большинством хозяйственно ценных морфологических признаков (кроме окраски листовой пластинки). Также была установлена средняя прямая связь данных морфологических признаков с содержанием каротинов и ксантофиллов и тесная – с содержанием виолоксантина, в то время как связь морфологических признаков с содержанием лютеина была средней и обратной. У признака «окраска листовой пластинки» связь с содержанием ксантофилла и виолоксантина была достоверной и обратной.

При фотопериоде 14 часов не было выявлено достоверной связи между содержанием каротина, ксантофиллов и морфологическими признаками. Корреляция между большинством морфологических признаков и содержанием виолоксантина и лютеина была прямой, средней (диаметр розетки, число

нормальных долей – с содержанием лютеина, число зачаточных долей – с содержанием виолоксантина) и тесной (количество листьев, масса растения, ширина пластинки).

При фотопериоде 16 часов корреляция большинства морфологических признаков с содержанием каротина была недостоверной и прямой, признаков «количество листьев» и «окраска листовой пластины» – недостоверной и обратной.

У образцов, выращенных при фотопериоде 16 часов, не было выявлено достоверных корреляций между морфологическими признаками и содержанием каротина, виолоксантина и лютеина, за исключением признака «количество листьев», связь с которым была прямой и средней. Связь содержания ксантофиллов была прямой и средней со всеми морфологическими признаками, кроме ширины и окраски листовой пластинки – с ними корреляционная связь была недостоверной.

Была выявлена средняя обратная связь содержания β-каротина с диаметром розетки и количеством листьев у растений, выращенных при фотопериоде 12 часов, и прямая средняя связь – с окраской пластинки. При фотопериоде 14 часов корреляционная связь оставалась достоверной и прямой только с окраской пластинки. У растений, выращенных при фотопериоде 16 часов, выявлена средняя положительная связь с числом нормальных долей листа.

Была выявлена обратная связь между содержанием зеленых пигментов (сумма хлорофиллов, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*) и морфологическими признаками (кроме окраски листовой пластинки) у образцов, выращенных при фотопериодах 12 и 14 часов. Связь с такими признаками, как «количество листьев», «масса растения» и «диаметр розетки», была средней. У признака «окраска листовой пластинки» связь была прямой средней при фотопериоде 12 часов и недостоверной – при фотопериоде 14 часов. У растений, выращенных при 16-часовом фотопериоде, были выявлены прямые средние связи с содержанием зеленых пигментов и числом нормальных долей, а также с шириной пластинки. С признаками «число зачаточных долей», «диаметр розетки» и «масса растения» связь была недостоверной. Выявлена обратная слабая связь между содержанием зеленых пигментов и окраской листовой пластинки.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено наличие взаимодействия «генотип-среда», проявляющегося при выращивании 16-ти образцов руколы в условиях интенсивной светокультуры при различных фотопериодах. Следует заметить, что показатель «длина дня», в отличие от других факторов внешней среды (температура, влажность и др.), относится к числу постоянных показателей и может быть достоверно спрогнозирован при сельскохозяйственном макро- и мезорайонировании культивируемых видов и сортов, включая их выращивание в контролируемых условиях (Жученко, 2008). Как известно, для высших растений, к которым относится и рукола, свет является это не только основным источником энергии в процессе синтеза органических веществ, определяющих биохимический состав растений, но и фактором регуляции их температуры, роста, развития и метаболизма в целом. При этом физиологическое воздействие может быть прямым и косвенным: прямое влияние на биохимические процессы, происходящие в клетках тканей растений, и метаболизм осуществляется через фотосинтез, а косвенное влияние оказывается на рост и развитие (как следствие контроля метаболических реакций и морфогенеза). Фотосинтез, за счет которого образуется 90–95% сухого вещества растения, происходит в хлоропластах. Именно поэтому количественный состав хлоропластов и каротиноидов играет существенную роль в процессе накопления сухого вещества и массы растений. Фотосинтетическая производительность и продуктивность растений могут быть повышены за счет использования генотипов (сортов, гибридов, образцов), которые способны сравнительно быстро после посева или посадки в максимальной степени увеличивать площадь листовой поверхности. К таким культурам относится и рукола, листья которой благодаря архитектонике и габитусу растений способны эффективно поглощать световую энергию. Продолжительность освещения также играет ключевую роль в адаптивных реакциях руколы. Как следует из полученных в ходе настоящего исследования данных, растения руколы в условиях 14-часового дня более эффективно использовали световую энергию, чем при 12-часовом фотопериоде. При 16-часовом фотопериоде показатели продуктивности снижались вследствие того, что растения формировали более мелкие и плотные листья, что является результатом адаптации к избыточному освещению.

Генетика фотопериодизма у множества сельскохозяйственных культур к настоящему времени изучена недостаточно полно. И все же, базируясь на полученных авторами данных, можно предположить, что реакция имеет наследственную основу и связана с реализацией основополагающего механизма взаимодействия «генотип-среда». Изучение реализации отдельных этапов данного взаимодействия, а также эффектов отражения и поглощения света листовыми пластинками руколы будет проведено в рамках дальнейших исследований авторов.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты показали, что световой период оказывает значительное влияние на большинство морфологических признаков и биохимических показателей руколы, выращиваемой методом проточной гидропоники в условиях интенсивной светокультуры. Двухфакторный дисперсионный анализ выявил наличие генотипической изменчивости среди образцов по большинству изученных признаков, а также позволил установить высокую отзывчивость культуры на изменение продолжительности светового периода. По ряду хозяйственно ценных морфологических признаков был определен наиболее благоприятный фотопериод для выращивания исследованных сортов руколы в условиях интенсивной светокультуры – 14 часов.

Анализ коэффициентов корреляции выявил постоянные средние и тесные обратные связи между содержанием сухого вещества и хозяйственно ценными морфологическими признаками (диаметр розетки, масса растения, количество листьев, ширина листовой пластинки). Также было установлено множество взаимосвязей между содержанием каротиноидов, хлорофиллов, β-каротина и морфологическими признаками, проявление которых варьировалось в зависимости от продолжительности фотопериода, причем связи становились более тесными при менее благоприятных для выращивания большинства исследованных образцов руколы фотопериодах (12 и 16 часов).

По совокупности морфологических признаков и биохимических показателей были выделены образцы руколы к-3 (страна происхождения – Греция) и к-8 (страна происхождения – Франция) как наиболее продуктивные и ценные по биохимическому составу. Они представляют наибольший интерес для культивирования в условиях интенсивной светокультуры, а также для использования в качестве источников хозяйственно ценных признаков в селекционной работе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А. М. Артемьевой (ФИЦ ВИР), любезно предоставившей образцы руколы из коллекции ВИР.

Список литературы

Артемьева А.М., Соловьева А.Е. Питательные и биологически активные соединения капусты краснокочанной // Овощи России. 2023. № 6. С. 84–89.

Бербеков К.З., Езаов А.К. Агробиологические особенности и продуктивность рукколы при использовании биопрепаратов // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2015. № 2(8). С. 41–45.

Гинс М.С., Харченко В.А., Гинс В.К., Байков А.А., Кононков П.Ф., Ушакова И.Т. Антиоксидантные характеристики зеленных и пряно-ароматических культур // Овощи России. 2015. № 2. С. 42–45.

Ермаков А.И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с.

Жученко А.А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы). Теория и практика. В трех томах. М.: Агрорус, 2008. 816 с.

Кондратенко Е.П., Мирошина Т.А., Витязь С.Н. Опыт выращивания микрозелени семейства Brassicaceae // Вестник АГАУ. 2022. № 7(213). С. 19–24.

Максименко В.П., Меньшикова С.А. Влияние мочевино-формальдегидного удобрения на уровень кислотности почвенного субстрата и урожайность рукколы // Агрохимический вестник. 2019. № 1. С. 53–55.

Методики испытаний на ООС. URL: https://gossortrf.ru/publication/metodiki-ispytaniy-na-oos.php (Дата обращения: 18.03.2024).

Панова Г.Г., Тепляков А.В., Новак А.Б., Левинских М.А., Артемьева А.М., Удалова О.Р., Хомяков Ю.В., Ильин Е.А., Чесноков Ю.В. Листовые салатные и капустные культуры в условиях антарктической станции «Восток»при круглогодичном выращивании в фитотехкомплексе: рост, развитие, урожай и качество товарной растительной продукции // Материалы Второй конференции «Генетические ресурсы и генетические технологии для развития северных территорий». Санкт-Петербург, 13–15 марта 2023 г. СПб.: ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова», 2023. С. 21.

Пухальская А.С. Возможность использования различных субстратов для производства микрозелени индау посевного (*Eruca sativa* L.) // Вестник молодежной науки. 2022. DOI: 10.46845/2541-8254-2022-1(31)-7-7

Серов Н.Н., Лебедев К.Н. Исследование влияния способов электрического обогрева в мини-теплицах на рост рукколы // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 1(22). С. 44–50.

Соловьева А.Е., Артемьева А.М. Биохимические исследования коллекции капусты: итоги и перспективы // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2012. Т. 169. С. 137–146.

Хаустова Н.А. Производство салата в зимних теплицах ЗАО «Агрокомбинат Московский» // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. №41. С. 29–32.

Chen J., Chen Z., Li Z., Zhao Y., Chen X., Wang-Pruski G., Guo R. Effect of photoperiod on Chinese kale (Brassica alboglabra) sprouts under white or combined red and blue light // Frontiers in plant science. 2021. DOI: 10.3389/fpls.2020.589746

Elmardy N.A., Yousef A.F., Lin K., Zhang X., Ali M.M., Lamlom S.F., Kalaji H.M., Kowalczyk K., Xu Y. Photosynthetic performance of rocket (Eruca sativa Mill.) grown under different regimes of light intensity, quality, and photoperiod // Plos one. 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.0257745

Pennisi G., Orsini F., Landolfo M., Pistillo A., Crepaldi A., Nicola S., Fernández J.A., Marcelis L.F.M., Gianquinto G. Optimal photoperiod for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs // European Journal of Horticultural Science. 2020. DOI: 10.17660/eJHS.2020/85.5.4

Song J., Huang H., Song S., Zhang Y., Su W., Liu H. Effects of photoperiod interacted with nutrient solution concentration on nutritional quality and antioxidant and mineral content in lettuce // Agronomy. 2020. DOI: 10.3390/agronomy10070920

Sut S., Boschiero I., Solana M., Malagoli M., Bertucco A., Dall'Acqua S. Supercritical CO_2 Extraction of Eruca sativa Using Cosolvents: Phytochemical Composition by LC-MS Analysis // Molecules. 2018. DOI: 10.3390/molecules23123240

Shen Y.Z., Guo S.S., Ai W.D., Tang Y.K. Effects of illuminants and illumination time on lettuce growth, yield and nutritional quality in a controlled environment // Life Sciences in Space Research. 2014. DOI: 10.1016/j.lssr.2014.06.001

References

Artem'yeva A.M., Solovyeva A.Ye. Pitatel'nyye i biologicheski aktivnyye soyedineniya kapusty krasnokochannoy [Nutrients and bioactive compounds of red cabbage] // *Ovoshchi Rossii*, 2023, no. 6, pp. 84–89.

Berbekov K.Z., Yezaov A.K. Agrobiologicheskiye osobennosti i produktivnost' rukkoly pri ispol'zovanii biopreparatov [Agrobiological characteristics and productivity of rocket when using biological products] // *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V.M. Kokova*, 2015, no. 2(8), pp. 41–45.

Gins M.S., Kharchenko V.A., Gins V.K., Baykov A.A., Kononkov P.F., Ushakova I.T. Antioksidantnyye kharakteristiki zelennykh i pryano-aromaticheskikh kul'tur [Antioxidant characteristics of green and aromatic crops] // *Ovoshchi Rossii*, 2015, no. 2, pp. 42-45.

Yermakov A.I. *Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy* [Methods of biochemical research of plants]. Leningrad.: Agropromizdat, 1987, 429 p.

Zhuchenko A.A. *Adaptivnoye rasteniyevodstvo (ekologo-geneticheskiye osnovy). Teoriya i praktika. V trekh tomakh* [Adaptive plant growing (ecological and genetic foundations). Theory and practice. In three volumes]. M.: Agrorus, 2008, 816 p.

Kondratenko Ye.P., Miroshina T.A., Vityaz' S.N. Opyt vyrashchivaniya mikrozeleni semeystva Brassicaceae [Experience in growing microgreens from the Brassicaceae family] // V*estnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2022, no. 7(213), pp. 19–24.

Maksimenko V.P., Men'shikova S.A. Vliyaniye mochevino-formal'degidnogo udobreniya na uroven' kislotnosti pochvennogo substrata i urozhaynost' rukkoly [The effect of urea-formaldehyde fertilizer on the acidity level of the soil substrate and the yield of rocket] // *Agrokhimicheskiy vestnik*, 2019, no. 1, pp. 53–55.

Metodiki ispytaniy na OOS. Available at: https://gossortrf.ru/publication/metodiki-ispytaniy-na-oos.php (accessed 18 March 2024).

Panova G.G., Teplyakov A.V., Novak A.B., Levinskikh M.A., Artem'yeva A.M., Udalova O.R., Khomyakov Yu.V., Il'in Ye.A., Chesnokov Yu.V. Listovyye salatnyye i kapustnyye kul'tury v usloviyakh antarkticheskoy stantsii «Vostok» pri kruglogodichnom vyrashchivanii v fitotekhkomplekse: rost, razvitiye, urozhay i kachestvo tovarnoy rastitel'noy produktsii [Leafy salad and cabbage crops in the conditions of the Antarctic station «Vostok» with year-round cultivation in a phytotechnical complex: growth, development, yield and quality of marketable plant products] // *Materialy Vtoroy konferentsii «Geneticheskiye resursy i geneticheskiye tekhnologii dlya razvitiya severnykh territoriy»*. Sankt-Peterburg, 13–15 marta 2023 g. SPb., 2023, pp. 21.

Pukhal'skaya A.S. Vozmozhnost' ispol'zovaniya razlichnykh substratov dlya proizvodstva mikrozeleni indau posevnogo (Eruca sativa L.) [Possibility of using various substrates for the production of microgreens (*Eruca sativa* L.)] // *Vestnik molodezhnoy nauki*, 2022. DOI: 10.46845/2541-8254-2022-1(31)-7-7

Serov N.N., Lebedev K.N. Issledovaniye vliyaniya sposobov elektricheskogo obogreva v mini-teplitsakh na rost rukkoly [Study of the influence of electric heating methods in mini-greenhouses on the growth of rocket] // *Agrotekhnika i energoobespecheniye*, 2019, no. 1(22), pp. 44–50.

Solovyeva A.Ye., Artem'yeva A.M. Biokhimicheskiye issledovaniya kollektsii kapusty: itogi i perspektivy [Biochemical studies of cabbage collection: results and prospects] // *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii*, 2012, vol. 169, pp. 137–146.

Khaustova N.A. Proizvodstvo salata v zimnikh teplitsakh ZAO «Agrokombinat Moskovskiy» [Lettuce production in winter greenhouses of JSC Agrokombinat Moskovskiy] // I*zvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, no. 41, pp. 29–32.

Chen J., Chen Z., Li Z., Zhao Y., Chen X., Wang-Pruski G., Guo R. Effect of photoperiod on Chinese kale (Brassica alboglabra) sprouts under white or combined red and blue light // Frontiers in plant science, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2020.589746

Elmardy N.A., Yousef A.F., Lin K., Zhang X., Ali M.M., Lamlom S.F., Kalaji H.M., Kowalczyk K., Xu Y. Photosynthetic performance of rocket (Eruca sativa Mill.) grown under different regimes of light intensity, quality, and photoperiod // Plos one, 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.025774

Pennisi G., Orsini F., Landolfo M., Pistillo A., Crepaldi A., Nicola S., Fernández J.A., Marcelis L.F.M., Gianquinto G. Optimal photoperiod for indoor cultivation of leafy vegetables and herbs // European Journal of Horticultural Science, 2020. DOI: 10.17660/eJHS.2020/85.5.4

Song J., Huang H., Song S., Zhang Y., Su W., Liu H. Effects of photoperiod interacted with nutrient solution concentration on nutritional quality and antioxidant and mineral content in lettuce // Agronomy, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10070920

Sut S., Boschiero I., Solana M., Malagoli M., Bertucco A., Dall'Acqua S. Supercritical CO_2 Extraction of Eruca sativa Using Cosolvents: Phytochemical Composition by LC-MS Analysis // Molecules, 2018. DOI: 10.3390/molecules23123240

Shen Y.Z., Guo S.S., Ai W.D., Tang Y.K. Effects of illuminants and illumination time on lettuce growth, yield and nutritional quality in a controlled environment // Life Sciences in Space Research, 2014. DOI: 10.1016/j.lssr.2014.06.001