СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ БИОЛОГИЯ, 2025, том 60, № 5, с. 852-865

Среда, стресс, адаптации

УДК 635.563:577.355.4:577.355.2 doi: 10.15389/agrobiology.2025.5.852rus

ОЦЕНКА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ, СПЕКТРАЛЬНЫХ И ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ У ОБРАЗЦОВ КРЕСС-САЛАТА (*Lepidium sativum* L.), ВЫРАЩЕННЫХ В РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ УСЛОВИЯХ

Е.М. ЭЗЕРИНА✉, Ю.В. ЧЕСНОКОВ

Кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) — перспективная, скороспелая, отзывчивая культура, представляющая интерес для условий светокультуры. Диагностика физиологического статуса служит важнейшей составляющей при выращивании растений в полевых, контролируемых и строго контролируемых условиях. Среди методов неинвазивного контроля физиологического состояния растений для регулируемых агроэкосистем наиболее эффективны и широко применяются метод спектрального анализа листовых пластинок и флуоресцентный метод. В настоящей работе на основании проведенных экспериментов впервые установлены корреляции морфологических показателей образцов кресс-салата с различными оптическими индексами в условиях светокультуры, теплицы и открытого грунта. Цель исследования — изучить влияние условий выращивания на морфологические признаки и оптические показатели листовых пластинок (флуоресценция хлорофилла и спектры отражения) образцов кресс-салата из коллекции ВИР и установить корреляции морфологических показателей с различными оптическими индексами, а также выявить высокопродуктивные, перспективные образцы, представляющие интерес для выращивания в условиях светокультуры. Объектами исследования были 17 образцов кресс-салата различного происхождения, полученные из коллекции ФГБНУ ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР). Вегетационные опыты в строго контролируемых условиях светокультуры проводили на агробиополигоне ФГБНУ Агрофизического НИИ (АФИ) (г. Санкт-Петербург) в 2024 году. Растения выращивали методом проточной гидропоники при фотопериоде 12, 14 и 16 ч. Растения выращивали в горшках для салатной линии объемом 0,1 л. Морфологическое описание проводили в фазу технической спелости на 26-29-е сут от посева. Вегетационные опыты в поликарбонатной теплице были проведены в Пушкинском филиале ВИР (г. Санкт-Петербург) в весенний период (посев 26 апреля) и в открытом грунте (посев 3 июля) в 2024 году. Схема выращивания была одинаковой как в тепличных, так и в полевых условиях — 5×10 см. Морфологическое описание проводили на 28-30-е сут. Оптические показатели измеряли на листьях среднего яруса репрезентативных растений каждого образца. Параметры флуоресценции хлорофилла и спектры отражения листьев регистрировали на 23-28-е сут вегетации с помощью миниатюрной оптоволоконной спектрометрической системы («Ocean Optics», США) и импульсного портативного флуориметра MINI-PAM-II («Heinz Walz GmbH», Германия). Оценивали индекс хлорофилла ChlRI, индекс соотношения каротиноидов к хлорофиллу SIPI, показатель рассеяния света R_{800}, фотохимический индекс PRI, индекс отражения антоцианов ARI, индекс старения PSRI, индекс феофитинизации NPQI. Показатели PRI и ARI использовали с модификацией и обозначали как PRI_{mod} и ARI_{mod}. Индекс феофетинизации также использовали с добавлением константы (C + NPQI; C = 5) для удобства интерпретации и далее обозначали как NPQI + c. Также оценивали показатели, полученные в результате флуоресцентного анализа: максимальный квантовый выход фотосистемы Fv/Fm; эффективный квантовый выход фотосистемы Y(II); квантовый выход Y(NO); Y(NPQ), характеризующий регулируемые потери энергии возбуждения за счет диссипации тепла. Показано, что морфологические признаки, характеризующие продуктивность зеленных культур (масса растения, диаметр и высота розетки, число листьев) значительно изменялись у различных образцов кресс-салата и под влиянием среды выращивания. В условиях светокультуры были отмечены фотопериоды, наиболее благоприятные для наращивания зеленой массы растений — 12 и 16 ч. Также при более продолжительном фотопериоде 16 ч был отмечен более быстрый переход к генеративной фазе, чем при более коротких. В результате сравнения с растениями, выращенными в условиях теплицы и открытого грунта, установлено, что в условиях светокультуры при благоприятных фотопериодах образцы достоверно не отличались по признаку средняя масса растения, однако начало перехода к цветению было отмечено у значительно меньшего числа образцов. Большинство оптических показателей значительно изменялись под действием фактора «условия выращивания» в зависимости от изучаемого генотипа. Отмечено достоверное снижение индекса ChlRI и показателя PRI_{mod} при выращивании образцов в полевых условиях и в теплице. Установлен достоверный рост индекса R_{800} в условиях агробиополигона, а также достоверный рост показателя SIPI в условиях светокультуры при менее благоприятном фотопериоде. Выявлены постоянные тесные и средние корреляционные связи между морфологическими признаками, характеризующими продуктивность (диаметр розетки, высота 1 растения, число листьев, масса 1 растения), и оптическими показателями R_{800}, PRI_{mod}, ARI_{mod}, Y(NPQ) (r = 0,51...–0,84, p = 0,05). По ряду агрономически ценных признаков выделены образцы к-112 (Местный, Азербайджан) и к-165 (Gar-

tenkresse, Бельгия) как наиболее перспективные для культивирования в условиях светокультуры и дальнейшей селекции. Отмечено совместное изменение признака масса 1 растения и индекса PRI_{mod} у выделенных генотипов, что позволяет сделать вывод о возможности использования оптических показателей не только в качестве инструмента мониторинга состояния растений и прогноза урожая, но и в качестве критерия для выделения перспективных и высокопродуктивных образцов, представляющих интерес для культивирования в условиях светокультуры и дальнейшей генетико-физиологической и селекционной работы.

Ключевые слова: *Lepidium sativum* L., кресс-салат, светокультура, открытый грунт, теплица, спектры отражения, флуоресценция хлорофилла, неинвазивные методы.

В современных условиях урбанизации и изменения климата растет потребность в круглогодичном обеспечении населения свежей растительной продукцией. Для решения этой задачи необходим комплексный подход, совмещающий использование передовых агротехнологий выращивания хозяйственно значимых растений и использование культур, способных максимально реализовать свой продукционный потенциал в различных условиях (1, 2).

В первую очередь интерес представляют быстрорастущие высокопродуктивные культуры, отзывчивые на интенсивные условия выращивания (3). Одна из таких культур — кресс-салат (*Lepidium sativum* L.). Как и многие другие овощные культуры рода *Brassica*, кресс-салат обладает ценным биохимическим составом — высоким содержанием витаминов, клетчатки и минералов, он также содержит большое количество фенольных соединений и известен своими противовоспалительными, антиоксидантными, иммуномодулирующими свойствами (1, 4). Кроме того, кресс-салат характеризуется малым периодом вегетации и, благодаря скороспелости и разнообразию форм, представляет особый интерес для возделывания в условиях светокультуры (5).

Светокультура растений в настоящее время находит все большее распространение как в сфере производства растительной продукции, так и при проведении научных исследований (6). Интенсивная светокультура реализует подход, основанный на удовлетворении всех основных потребностей растения и исключении стрессовых факторов, влияющих на рост и развитие, а также позволяет осуществлять подбор оптимальных условий среды для конкретных культур или генотипов. Одним из важных объектов подбора и регулирования служат параметры световой среды, поскольку они определяют эффективность фотосинтеза, рост растений и качество получаемой продукции. Исследования влияния состава (7, 8) и интенсивности (9, 10) света на продуктивность и биометрические показатели различных культур, в том числе кресс-салата (11-13), активно проводятся в настоящее время. Однако изучение влияния фотопериода на рост и развитие кресс-салата в условиях светокультуры остается актуальной задачей.

Диагностика физиологического статуса растений служит неотъемлемой частью современного растениеводства. Традиционно физиологическое состояние растений оценивается с помощью биохимических анализов, что представляет собой трудоемкий и продолжительный по времени процесс и сопровождается частичным или полным разрушением объекта. В настоящее время все большую популярность приобретают современные агрофизические оптические методы мониторинга, способные без разрушения растительного объекта регистрировать адаптационные изменения процессов фотосинтеза, происходящие в клетках в ответ на изменения условий окружающей среды. Неинвазивные оптические методы позволяют выявлять перспективные генотипы, устойчивые к тем или иным негативным факторам (14), оценивать влияние среды выращивания на физиологический статус

растений (15, 16), выявлять их угнетенное состояние на ранних стадиях (17, 18). Среди современных методов неинвазивного контроля физиологического состояния растений для регулируемых агроэкосистем наиболее эффективны метод спектрального анализа листовых пластинок и флуоресцентный метод (19).

В настоящей работе на основании проведенных экспериментов впервые установлены корреляции морфологических показателей образцов кресс-салата с различными оптическими индексами в условиях светокультуры, теплицы и открытого грунта.

Цель исследования — изучить влияние условий выращивания на морфологические признаки и оптические показатели листовых пластинок (флуоресценция хлорофилла и спектры отражения) образцов кресс-салата из коллекции ВИР и установить корреляции морфологических показателей с различными оптическими индексами, а также выявить высокопродуктивные, перспективные образцы, представляющие интерес для выращивания в условиях светокультуры.

Методика. Объектами исследования были 17 образцов кресс-салата различного происхождения, полученные из коллекции ФГБНУ ФИЦ Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР): к-1 (Garten kress, Германия), к-27 (Fine curled, Канада), к-41 (Broad leaf, Канада), к-42 (Узколистный 3, Россия), к-48 (без названия, Азербайджан), к-63 (без названия, Грузия), к-66 (без названия, Афганистан), к-78 (Местный, Россия), к-79 (Местный, Россия), к-85 (Cresson aienois, Франция), к-91 (без названия, Иран), к-97 (Местный, Армения), к-112 (Местный, Азербайджан), к-118 (без названия, Пакистан), к-127 (Местный, Азербайджан), к-165 (Gartenkresse, Бельгия), к-185 (Almindelig, Дания).

Вегетационные опыты в строго контролируемых условиях светокультуры проводили на агробиополигоне ФГБНУ Агрофизического НИИ (АФИ) (г. Санкт-Петербург) в 2024 году. Растения выращивали методом проточной гидропоники при фотопериоде 12, 14 и 16 ч. В качестве источника света использовали газоразрядные зеркализированные натриевые лампы ДНаЗ-400 (ООО «Рефлакс», Россия), облученность в области ФАР — 75-80 Вт/м^2. Субстратом служил грунт на основе торфа Агробалт-С (ООО «Пиндструп», Россия). Для проточной гидропоники использовали модифицированный раствор Кнопа следующего состава: $Ca(NO_3)_2$ — 0,94 г/л, KNO_3 — 0,23 г/л, KH_2PO_4 — 0,25 г/л, $MgSO_4$ — 0,25 г/л, $MgCl_2$ — 0,17 г/л, CH_4N_2O — 0,05 г/л, $Fe(NH_4)_3(C_6H_5O_7)_2$ — 0,0087 г/л, H_3BO_3 — 0,0029 г/л, $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ — 0,0019 г/л, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ — 0,0002 г/л, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ − 0,0002 г/л. Растения выращивали в горшках для салатной линии объемом 0,1 л, в каждый высаживали по 10 растений с дальнейшим прореживанием до 4 растений на горшок в фазу 1-го настоящего листа. Повторность опыта трехкратная, объем анализируемой выборки — 16 растений каждого образца. Морфологическое описание проводили в фазу технической спелости на 26-29-е сут от посева в соответствии с методиками ФГБУ «Госсорткомиссии» RTG/02485/1; RTG/01/3 (Методики испытаний на ООС).

Вегетационные опыты в поликарбонатной теплице были проведены в Пушкинском филиале ВИР (г. Санкт-Петербург) в весенний период (посев 26 апреля) и в открытом грунте (посев 3 июля) в 2024 году. Схема выращивания была одинаковой как в тепличных, так и в полевых условиях: 5×10 см, повторность трехкратная, объем выборки — 20 растений каждого образца. Морфологическое описание проводили на 28-30-е сут (Методики испытаний на ООС).

Оптические показатели измеряли на листьях среднего яруса репре-

зентативных растений каждого образца. Параметры флуоресценции хлорофилла и спектры отражения листьев регистрировали перед уборкой, на 23-28-е сут вегетации, с помощью миниатюрной оптоволоконной спектрометрической системы («Ocean Optics», США) и импульсного портативного флуориметра MINI-PAM-II («Heinz Walz GmbH», Германия). Для каждого образца было зарегистрировано не менее 15 спектров отражения листовых пластинок и 5 измерений индукции флуоресценции хлорофилла а. Спектральные индексы рассчитывали с использованием программы Microsoft Excel, параметры флуоресценции хлорофилла а — автоматически, при помощи программного обеспечения WinControl-3 («Heinz Walz GmbH», Германия).

Оценивали следующие показатели, полученные по результатам контактной спектроскопии: индекс хлорофилла ChlRI (chlorophyll index), тесно связанный с содержанием зеленых пигментов и характеризующий емкость фотосинтетического аппарата; индекс соотношения каротиноидов к хлорофиллу SIPI (structural independent pigment index), чувствительный к пигментным изменениям, происходящим в листе при стрессе; показатель рассеяния света R_{800} (где 800 — длина волны, нм), зависящий от внутренней структуры листа, выражающий отношение площади поверхности мезофилла к площади листа; фотохимический индекс PRI (photochemical reflectance index); индекс отражения антоцианов ARI (anthocyanin reflectance index), тесно связанный с их содержанием; индекс старения PSRI (plant senescence reflectance index), характеризующий соотношения количества каротиноидов к хлорофиллу; индекс феофитинизации NPQI (normalized phaeophytinization index), отражающий деградацию хлорофилла (20-24). Показатели PRI и ARI использовали с модификацией [(C1-PRI) · C2; C1 = 0,1; C2 = 10 и C + ARI; C = 0,9] и обозначали соответственно как PRI_{mod} и ARI_{mod}. Индекс феофетинизации также использовали с добавлением константы (C + NPQI; C = 5) для удобства интерпретации и далее обозначали как NPQI + c. Также оценивали показатели, полученные в результате флуоресцентного анализа: максимальный квантовый выход фотосистемы Fv/Fm; эффективный квантовый выход фотосистемы Y(II); квантовый выход Y(NO), представляющий нерегулируемые потери энергии возбуждения, включая рассеяние тепла и флуоресцентное излучение; квантовый выход Y(NPQ), характеризующий регулируемые потери энергии возбуждения за счет диссипации тепла (25-27).

Статистическую обработку данных выполняли с помощью программы STATISTICA v.10.0 («StatSoft, Inc.», США). Определяли среднее значение каждого показателя (*M*), стандартную ошибку среднего (±SEM), НСР при 5 % уровне значимости, коэффициенты вариации значений показателей и признаков, коэффициенты корреляции изучаемых показателей, проводили дисперсионный анализ (ANOVA). Силу факторного влияния η^2 для факторов «генотип» и «условия выращивания» определяли в процентах как отношение соответствующей суммы квадратов отклонений изучаемых показателей от их средних значений к общей сумме квадратов. Существенность различий между вариантами оценивали по показателю наименьшей существенной разницы.

Результаты. Изменчивость признаков характеризует норму реакции вида на воздействия факторов среды. Наиболее значимыми количественными признаками, определяющими ценность зеленной продукции, для многих овощных культур служат масса растения, число листьев, размеры формируемой листовой розетки. Мы рассмотрели динамику изменения некоторых морфологических признаков для исследуемых образцов кресс-

салата в зависимости от условий выращивания (табл. 1).

1. Морфологические показатели образцов кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) в зависимости от условий выращивания (n = 17, M±SEM)

Признак	Условия выращивания					НСР$_{05}$
	светокультура			теплица	открытый грунт	
	12 ч	14 ч	16 ч			
Диаметр розетки, см	11,66±0,36	11,18±0,40	11,75±0,31	10,40±0,49	10,71±0,39	1,217
Cv, %	12,94	15,09	11,13	19,82	15,35	
Высота 1 растения, см	12,85±0,57	11,63±0,37	13,06±0,40	17,53±0,98	15,94±0,69	1,96
Cv, %	18,88	13,60	12,94	23,60	18,33	
Число листьев, шт.	8,88±0,20	9,05±0,14	9,30±0,18	10,88±0,27	7,42±0,33	0,72
Cv, %	9,48	6,77	8,21	10,52	18,69	
Масса 1 растения, г	3,64±0,45	2,51±0,17	3,81±0,28	2,98±0,27	3,69±0,33	0,97
Cv, %	52,65*	28,41	30,97	18,33	37,92*	

Примечание. В таблице представлены средние значения по совокупности образцов (17 образцов). Для каждого образца брали среднее из 16 измерений в случае строгоконтролируемых условий светокультуры и среднее из 20 измерений — в случае полевых условий и теплицы. Звездочкой отмечены величины коэффициента вариации *Cv*, превышающие критический уровень 33 %. Вегетационные опыты в строго контролируемых условиях светокультуры проводили на агробиополигоне ФГБНУ Агрофизического НИИ (г. Санкт-Петербург) в 2024 году. Вегетационные опыты в поликарбонатной теплице были проведены в Пушкинском филиале ВИР (г. Санкт-Петербург) в весенний период (посев 26 апреля) и в открытом грунте (посев 3 июля) в 2024 году.

В строго контролируемых условиях светокультуры при фотопериодах 12 и 16 ч реализация продукционного потенциала образцов кресс-салата происходила наиболее полно: были отмечены достоверно более высокие значения массы, чем при фотопериоде 14 ч (на 1,13 г и 1,30 г, НСР$_{05}$ = 0,98), а также увеличение диаметра розетки и высоты растения в виде тенденции. Такая неоднозначная реакция на продолжительность светового дня может быть объяснена значительной изменчивостью совокупности образцов по указанным признакам и индивидуальностью реакции отдельных генотипов на более короткий и более длинный фотопериод. Наибольшая изменчивость наблюдалась у признака масса 1 растения: коэффициент вариации *Cv* составил от 18,33 до 52,65 % в зависимости от условий выращивания.

Высокая изменчивость генотипов кресс-салата по многим хозяйственно ценным признакам уже была отмечена ранее (5). В исследованиях, посвященных регулированию световых условий, нередко отмечают значительное влияние фотопериода на морфологические признаки других представителей капустных. Так, короткий световой день положительно влиял на площадь листьев горчицы, а более продолжтельный приводил к удлинению стеблей (28). Более короткий фотопериод приводил к увеличению площади листьев и высоты растений у руколы при одновременном регулировании других световых условий — спектрального состава и интенсивности света (9).

В условиях теплицы растения формировали розетку с достоверно меньшим диаметром относительно растений, выращенных в условиях светокультуры при более благоприятных фотопериодах 12 и 16 ч (на 1,23 см и 1,35 см, НСР$_{05}$ = 1,19). Высота растений и число листьев также были больше, чем при всех других условиях выращивания, однако средняя масса растения достоверно не отличалась.

В полевых условиях масса растений была сравнима с показателем у растений, выращенных при благоприятных фотопериодах в условиях светокультуры и в теплице, но значительно выше, чем при менее благоприятном фотопериоде 14 ч (на 1,18 г, НСР$_{05}$ = 0,98), при этом число листьев оказалось меньшим по сравнению с остальными условиями. В условиях теплицы и особенно открытого грунта происходило наращивание массы за счет значительно более раннего перехода к стеблеванию у большинства генотипов.

В условиях теплицы и открытого грунта к окончанию вегетации начало стеблевания было отмечено у 15 из 17 образцов (88 % образцов), в то время как в условиях светокультуры — у 5 из 17 образцов (29 %) при фотопериодах 12 и 14 ч, и у 8 из 17 образцов (47 %) при фотопериоде 16 ч.

Для оценки влияния факторов «генотип» и «условия выращивания» на морфологические признаки группы образцов, а также совместного влияния факторов мы провели двухфакторный дисперсионный анализ. Сила факторного влияния η^2 генотипа для признаков диаметр розетки, высота 1 растения, число листьев, масса 1 растения составляла соответственно 16,13; 15,93; 11,89 и 19,55 % при $p < 0,05$; условий выращивания — 6,65; 30,47; 36,82 и 7,71 % при $p < 0,05$, а совместное действие факторов — 31,17; 30,93; 17,14 и 40,09 % при $p < 0,05$. Следовательно, влияние факторов было достоверным для всех исследованных морфологических признаков.

Из полученных данных можно сделать вывод, что в условиях светокультуры исследуемые образцы кресс-салата формировали более компактные розетки, значительно позже переходили к началу генеративной фазы, при этом растения, выращенные в условиях более благоприятных фотопериодов (12 и 16 ч) не уступали или превосходили по массе тепличные и полевые (рис. 1).

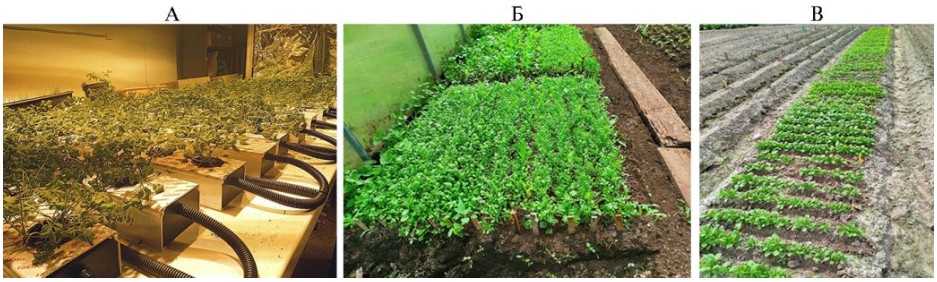

Рис. 1. Растения образцов кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) в различных условиях выращивания: А — строго контролируемые условия светокультуры (ФГБНУ Агрофизический НИИ, г. Санкт-Петербург, 2024 год), Б — теплица (Пушкинский филиал ВИР, г. Санкт-Петербург, 2024 год), В — открытый грунт (Пушкинский филиал ВИР, г. Санкт-Петербург, 2024 год).

Замедление перехода к цветению, как и достаточно высокие значения морфологических признаков, характеризующих продуктивность при подборе благоприятного фотопериода позволяют сделать вывод о перспективности выращивания кресс-салата в светокультуре. В то время как условия светокультуры дают возможность управлять продукционным процессом посредством регулирования условий окружающей среды, в теплице и открытом грунте в течении вегетации на растения оказывает влияние множество нерегулируемых факторов, что затрудняет выделение отдельных стрессоров, приводящих к тем или иным реакциям растений. Выращивание в светокультуре может приводить как к уменьшению продуктивности растений, относительно ограниченно контролируемых условий и естественного освещения, так и к значительному росту. Так, при сравнении массы растений салата, выращенных при использовании искуственного освещения, отмечалось увеличение на 60 % (29).

При сравнении средних значений массы отдельных образцов со средним по всем образцам нами были отмечены наиболее перспективные генотипы для выращивания в светокультуре — образцы к-112 (Местный, Азербайджан), к-165 (Gartenkresse, Бельгия) (рис. 2). Они демонстрировали высокие значения массы относительно среднего по исследуемым образцам при фотопериодах 12 и 16 ч (12 ч — 6,04 и 5,91 г при средней массе по образцам 3,60 г, $НСР_{05} = 1,17$; 16 ч — 5,64 и 5,45 г при средней массе по

образцам 3,88 г, НСР$_{05}$ = 1,29), а также средние при фотопериоде 14 ч (3,19 и 3,00 г при средней массе по образцам 2,54 г, НСР$_{05}$ = 0,66).

Рис. 2. Растения наиболее перспективных образцов кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), выращенные в условиях светокультуры на 26-е сут вегетации: А — к-112 (Местный, Азербайджан), Б — к-165 (Gartenkresse, Бельгия) (ФГБНУ Агрофизический НИИ, г. Санкт-Петербург, 2024 год).

Оба образца оказались устойчивыми к раннему стеблеванию в условиях светокультуры, при всех исследованных фотопериодах не было зафиксировано начала стеблевания к концу вегетации (26-29-е сут). В условиях теплицы масса растений этих образцов была сравнима со средней: для образца к-112 — 1,91 г, для к-165 — 2,57 г при средней по образцам 2,93 г (НСР$_{05}$ = 1,11). В условиях открытого грунта масса растения образца к-112 составляла 3,47 г при средней по образцам 3,70 г (НСР$_{05}$ = 1,19), а масса образца к-165 оказалась достоверно выше средней и составляла 5,14 г, что выделяет к-165 не только как перспективный для культивирования в условиях светокультуры, но и создает предпосылки для его выделения как потенциально перспективного для выращивания в открытом грунте в условиях Ленинградской области. Образец к-112 уже ранее был отмечен как отличающийся высокой продуктивностью в условиях светокультуры, а также выделился ценным биохимическим составом (5).

Исследованные нами оптические показатели также значительно изменялись у растений, выращенных в различных условиях (табл. 2).

2. Оптические индексы образцов кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) в зависимости от условий выращивания (n = 17, M±SEM)

Показатель	Условия выращивания					НСР$_{05}$
	светокультура			теплица	открытый грунт	
	12 ч	14 ч	16 ч			
ChlRI	0,37±0,01	0,40±0,01	0,41±0,01	0,33±0,01	0,33±0,01	0,03
Cv, %	10,80	14,33	12,87	7,71	9,48	
SIPI	1,00±0,00	1,01±0,00	1,00±0,00	1,00±0,00	1,02±0,01	0,01
Cv, %	2,75	0,56	0,69	0,30	2,62	
R_{800}	55,99±5,98	38,43±2,56	42,90±4,04	24,19±0,86	27,16±0,67	10,73
Cv, %	45,33*	28,24	39,91*	14,64	10,24	
PRI_{mod}	0,34±0,16	0,32±0,14	0,33±0,15	0,02±0,02	0,17±0,02	0,36
Cv, %	197,9*	185,16*	189,74*	491,61*	52,35*	
ARI_{mod}	0,85±0,12	0,83±0,12	0,74±0,11	1,09±0,02	1,20±0,01	0,28
Cv, %	59,49*	62,32*	60,95*	7,79	3,70	
PSRI	0,99±0,00	0,99±0,00	0,99±0,00	0,97±0,00	0,98±0,00	0,00
Cv, %	1,16	0,46	0,31	0,65	0,55	
NPQI + c	5,06±0,07	4,90±0,08	5,16±0,03	5,14±0,01	5,21±0,02	0,16
Cv, %	6,05	6,68	2,44	1,00	1,31	
Y(II)	0,09±0,01	0,10±0,01	0,09±0,01	0,17±0,02	0,13±0,01	0,03
Cv, %	24,69	24,67	36,39*	36,45*	32,26*	
Y(NO)	0,70±0,02	0,83±0,02	0,79±0,02	0,63±0,03	0,72±0,03	0,07
Cv%	9,64	10,42	11,24	16,88	18,42	

Продолжение таблицы 3

Y(NPQ)	0,40±0,06	0,16±0,02	0,12±0,02	0,21±0,02	0,16±0,02	0,09
Cv, %	61,51*	50,59*	55,40*	32,49*	62,30*	
Fv/Fm	0,73±0,02	0,73±0,01	0,76±0,02	0,83±0,01	0,81±0,00	0,05
Cv, %	9,85	7,17	13,06	2,68	2,41	

Примечание. ChlRI — индекс хлорофилла (chlorophyll index), SIPI — индекс соотношения каротиноидов к хлорофиллу (structural independent pigment index), R_{800} показатель — рассеяния света (где 800 — длина волны, нм), PRI_{mod} и ARI_{mod} — соответственно фотохимический индекс (photochemical reflectance index) и индекс отражения антоцианов (anthocyanin reflectance index) с модификацией, PSRI — индекс старения PSRI (plant senescence reflectance index), NPQI + c — индекс феофитинизации с добавлением константы (C = 5), Y(II) — эффективный квантовый выход фотосистемы, Y(NO) — квантовый выход, представляющий нерегулируемые потери энергии возбуждения, Y(NPQ) — квантовый выход, характеризующий регулируемые потери энергии возбуждения, Fv/Fm — максимальный квантовый выход фотосистемы. В таблице представлены средние значения по совокупности образцов (17 образцов). Для каждого образца среднее значение индекса рассчитывалось на основании не менее 15 спектров и не менее 5 измерений параметров флуоресценции. Звездочкой отмечены величины коэффициента вариации *Cv*, превышающие критический уровень 33 %. Вегетационные опыты в строго контролируемых условиях светокультуры проводили на агробиополигоне ФГБНУ Агрофизического НИИ (г. Санкт-Петербург) в 2024 году. Вегетационные опыты в поликарбонатной теплице были проведены в Пушкинском филиале ВИР (г. Санкт-Петербург) в весенний период (посев 26 апреля) и в открытом грунте (посев 3 июля) в 2024 году.

Индекс хлорофилла ChlRI был значительно выше в условиях светокультуры при всех трех фотопериодах, чем в теплице и открытом грунте (разница > $НСР_{05}$ = 0,03). Для растений, выращенных в условиях светокультуры при различных фотопериодах, также отмечали различия: значения индекса хлорофилла росли при увеличении продолжительности светового дня. Статистически значимые различия были отмечены между фотопериодами 12 и 14 ч и в виде тенденции между фотопериодами 14 и 16 ч (разница составляла 0,03 и 0,01 при $НСР_{05}$ = 0,03). Индекс старения растений PSRI, характеризующий пигментное соотношение каротиноидов к хлорофиллам, не изменялся в условиях светокультуры, однако значительно снижался в полевых и тепличных условиях (на 0,03 и 0,02, $НСР_{05}$ = 0,00).

Индекс SIPI оказался значительно выше при фотопериоде 14 ч в условиях светокультуры, чем при более благоприятных фотопериодах (на 0,01 при $НСР_{05}$ = 0,01). Также было отмечено достоверное повышение индекса в условиях открытого грунта относительно всех других условий. Показатель R_{800} был значительно ниже в теплице и открытом грунте, чем в условиях светокультуры (на 14,24-31,8 и 11,27-28,83, $НСР_{05}$ = 10,73). Этот индекс зависит от структуры листа, и такая динамика свидетельствовала о структурных изменениях, происходивших в клетках растения.

Индекс PRI_{mod} характеризует нефотохимическое тушение и снижался в условиях теплицы и открытого грунта относительно значений, полученных в условиях биополигона, что согласуется с результатами флуоресцентного анализа. Показатель YII характеризует эффективность фотохимического преобразования энергии возбуждения и значительно увеличивался в условиях теплицы и открытого грунта (на 0,04-0,07, $НСР_{05}$ = 0,03), в то время как величина индекса Y(NO), характеризующего нефотохимическое гашение флуоресценции хлорофилла, имела тенденцию к уменьшению значений. Индекс Fv/Fm представляет максимальный квантовый выход фотосистемы II и описывает максимально возможную емкость фотосинтетического аппарата. Этот индекс увеличивался в условиях теплицы и открытого грунта, что может сигнализировать о формировании фотосинтетического аппарата со значительно большей емкостью относительно растений, выращенных в строго контролируемых условиях (на 0,05-0,10, $НСР_{05}$ = 0,05). Показатель ARI_{mod}, характеризующий содержание антоцианов, выполняющих защитную функцию в клетках растений, достоверно рос в условиях теплицы и поля (на 0,24-0,46, $НСР_{05}$ = 0,28), что могло сигнализировать об избыточном освещении.

Вариация PRI_{mod} и Y(NPQ) оказалась выше критического уровня 33 % при всех условиях выращивания, что, вероятно, было связано с высокой изменчивостью образцов по этим показателям. Индексы R_{800} и ARI_{mod} демонстрировали высокую вариабельность в условиях светокультуры (28,00-62,32 %) и относительно низкую (3,70-14,64 %) в условиях теплицы и открытого грунта. Это можно объяснить индивидуальностью реакции отдельных генотипов в условиях наличия одного стрессора, что разделяет исследуемые образцы на чувствительные и нечувствительные к определенной продолжительности фотопериода.

Индексы хлорофилла и антоцианов характеризуют содержание соответствующих пигментов. Полученные данные об увеличении количества зеленых пигментов в условиях светокультуры с увеличением продолжительности светового дня согласуется с другими исследованиями: так, подобная динамика была отмечена у некоторых образцов руколы (30). Увеличение содержания фотосинтетичесих пигментов в более зрелых листьях, выращенных при фотопериоде 16 ч, было отмечено у листовой горчицы (28). Повышенное содержание хлорофиллов у растений кресс-салата, выращенных в условиях светокультуры, относительно растений, выращенных в условиях открытого грунта, также было описано ранее (31). Индекс ARI_{mod} в нашем исследовании не изменялся значительно в условиях светокультуры, однако наблюдалась тенденция на его снижение с увеличением продолжительности светового дня, что расходится с данными, полученными при исследовании фотопериодической реакции других представителей семейства (30, 32).

По результатам двухфакторного дисперсионного анализа установлено, что влияние факторов «генотип» и «условия выращивания» было значимым для всех исследованных оптических индексов, за исключением индексов старения и феофитинизации (табл. 3).

3. Сила факторного влияния η^2 факторов «генотип» и «условия выращивания» на общую дисперсию оптических индексов, полученных по результатам контактной спектроскопии листьев кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), в зависимости от условий выращивания (ФГБНУ Агрофизический НИИ, г. Санкт-Петербург, 2024 год; Пушкинский филиал ВИР, г. Санкт-Петербург, 2024 год)

Фактор	Показатель						
	Спектральные индексы						
	ChlRI	SIPI	R_{800}	PRI_{mod}	ARI_{mod}	PSRI	NPQI + c
Условия выращивания	24,36*	7,39*	38,10*	7,49*	15,79*	4,80	0,53
Генотип	12,07*	2,99*	27,01*	45,86*	38,74*	1,65	1,13
Взаимодействие факторов	28,45*	9,65*	29,85*	39,46*	33,08*	8,38*	6,02
	Показатели флуоресценции						
	YII		Y(NO)		Y(NPQ)		Fv\Fm
Условия выращивания	32,24*		30,33*		15,95*		24,10*
Генотип	15,89*		15,41*		18,36*		14,63*
Взаимодействие факторов	36,91*		41,26*		46,03*		44,94*

Примечание. ChlRI — индекс хлорофилла (chlorophyll index), SIPI — индекс соотношения каротиноидов к хлорофиллу (structural independent pigment index), R_{800} показатель — рассеяния света (где 800 — длина волны, нм), PRI_{mod} и ARI_{mod} — соответственно фотохимический индекс (photochemical reflectance index) и индекс отражения антоцианов (anthocyanin reflectance index) с модификацией, PSRI — индекс старения PSRI (plant senescence reflectance index), NPQI + c — индекс феофитинизации с добавлением константы (C = 5), Y(II) — эффективный квантовый выход фотосистемы, Y(NO) — квантовый выход, представляющий нерегулируемые потери энергии возбуждения, Y(NPQ) — квантовый выход, характеризующий регулируемые потери энергии возбуждения, Fv/Fm — максимальный квантовый выход фотосистемы. *Достоверное влияние факторов при p = 0,05.

Динамика спектральных и флуоресцентных индексов, характеризует изменения в фотосинтетических процессах растений кресс-салата, вызванные воздействием среды выращивания, что также отразилось на проявлении некоторых количественных морфологических признаков.

Для оценки взаимосвязи оптических показателей и морфологиче-

ских признаков мы провели корреляционный анализ. Постоянные и наиболее высокие значения коэффициента корреляции Пирсона между морфологическими признаками и некоторыми оптическими показателями представлены в таблице 4.

4. Значения коэффициента корреляции Пирсона *r* между некоторыми хозяйственно ценными морфологическими признаками и оптическими показателями, полученными по результатам контактной спектроскопии листьев кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), в зависимости от условий выращивания (n = 17)

Морфологический признак/оптический показатель	Условия выращивания				
	светокультура			теплица	открытый грунт
	12 ч	14 ч	16 ч		
Масса 1 растения, г/Y(NPQ)	0,77*	0,51*	0,56*	–0,36	–0,46
Масса 1 растения, г/R_{800}	–0,63*	–0,84*	–0,78*	–0,05	0,08
Масса 1 растения, г/PRI_{mod}	–0,69*	–0,68*	–0,79*	–0,25	–0,31
Высота 1 растения, см/Y(NPQ)	0,72*	0,55*	0,55*	0,58*	–0,49*
Высота 1 растения, см/R_{800}	–0,67*	–0,82*	–0,63*	0,02	0,07
Высота 1 растения, см/PRI_{mod}	–0,65*	–0,72*	–0,70*	–0,04	–0,57*

Примечание. Y(NPQ) — квантовый выход, характеризующий регулируемые потери энергии возбуждения, R_{800} показатель — рассеяния света (где 800 — длина волны, нм), PRI_{mod} — фотохимический индекс (photochemical reflectance index) с модификацией. Вегетационные опыты в строго контролируемых условиях светокультуры проводили на агробиополигоне ФГБНУ Агрофизического НИИ (г. Санкт-Петербург) в 2024 году. Вегетационные опыты в поликарбонатной теплице были проведены в Пушкинском филиале ВИР (г. Санкт-Петербург) в весенний период (посев 26 апреля) и в открытом грунте (посев 3 июля) в 2024 году.
* Достоверные зависимости при $p < 0,05$.

В условиях светокультуры корреляционная связь представленных индексов и морфологических признаков оставалась значимой ($p < 0,05$), средней или тесной при всех исследованных фотопериодах. В условиях теплицы и открытого грунта большинство зависимостей оказались не достоверными, за исключением средней и умеренной корреляции показателя флуоресценции Y(NPQ) и морфологического признака высота 1 растения (соответственно $r = 0,58$ и –0,49, $p < 0,05$), а также средней зависимости нефотохимического индекса PRI_{mod} и высоты 1 растения в условиях открытого грунта ($r = –0,57$, $p < 0,05$).

Индексы PRI_{mod} и Y(NPQ) проявляли достоверную ($p < 0,05$) взаимосвязь с некоторыми агрономически значимыми морфологическими признаками, а также имели обратную динамику с признаком масса 1 растения у выделенных образцов в различных условиях выращивания. Так, в условиях светокультуры значения индекса PRI_{mod} у выделившихся по массе генотипов к-112 и к-165 были ниже среднего по образцам (разница составляла от 0,45 до 0,79 при $НСР_{05}$ от 0,09 до 0,12). При выращивании в условиях теплицы и открытого грунта значения индекса PRI_{mod} достоверно не отличались от средних (разница от 0,00 до 0,08 при $НСР_{05}$ 0,11 и 0,16).

Подбор оптимальных условий выращивания и выявление потенциально высокопродуктивных образцов — это актуальная, но трудоемкая задача. Наиболее эффективно она реализуется в условиях искусственного освещения. Современные оптические методы способны снизить временны́е и ресурсные затраты и обеспечить неинвазивный, то есть не требующий разрушения объекта изучения, мониторинг состояния растений. В результате проведенного исследования наиболее перспективными в качестве индикаторов изменений в структуре листьев и фотохимической активности, вызванных стрессом, и в качестве критериев для определения оптимальных условий выращивания, особенно в строго контролируемых условиях выращивания, оказались спектральные индексы ChlRI, R_{800}, PRI_{mod}, SIPI и показатели Y(NO), Fv/Fm, полученные в результате флуоресцентного анализа. В условиях светокультуры некоторые из этих оптических индексов имели тесную связь с морфологическими признаками, характеризующими продук-

тивность растений, — с высотой 1 растения, массой 1 растения, что подтверждает возможность их использования для прогнозирования продуктивности кресс-салата.

Динамика изменения фотохимического индекса в значительной степени совпадала с динамикой изменения массы 1 растения для образцов, выделившихся высокой продуктивностью в условиях светокультуры. Рост значений индекса PRI_{mod} свидетельствовал о снижении фотохимического тушения флуоресценции хлорофилла, то есть об угнетенном состоянии фотосинтетической системы в неблагоприятных для выбранных образцов условиях, и сопровождался снижением продуктивности растений. Установлено, что оптические показатели способны быть эффективным неинвазивным критерием для оценки и отбора перспективных образцов кресс-салата. Для выявления более тесных корреляционных связей с продуктивностью растений и расширения спектра оптических показателей необходимы дальнейшие исследования.

Таким образом, морфологические признаки кресс-салата, характеризующие продуктивность зеленных культур (масса растения, диаметр и высота розетки, число листьев) значительно изменялись у различных образцов и под влиянием среды выращивания. В условиях светокультуры были отмечены фотопериоды, наиболее благоприятные для наращивания зеленой массы растений исследованных образцов кресс-салата, — 12 и 16 ч. Также при более продолжительном фотопериоде 16 ч у образцов кресс-салата отмечен более быстрый переход к генеративной фазе, чем при менее продолжительных фотопериодах. В результате сравнения с растениями, выращенными в теплице и открытом грунте, было установлено, что в условиях светокультуры при благоприятных фотопериодах образцы кресс-салата достоверно не отличались по средней массе, однако начало перехода к цветению наблюдалось у значительно меньшего числа растений. Большинство оптических показателей у образцов кресс-салата значительно изменялись под действием факторов «генотип», «условия выращивания» и при их совместным действии. Было отмечено статистически значимое снижение индекса ChlRI и показателя PRI_{mod} при выращивании в тепличных и полевых условиях, достоверный рост индекса R_{800} в условиях агробиополигона, а также достоверный рост показателя SIPI в условиях светокультуры при менее благоприятном фотопериоде. Выявлены постоянные тесные и средние корреляционные связи между морфологическими признаками, характеризующими продуктивность (диаметр розетки, высота 1 растения, число листьев, масса 1 растения), и оптическими показателями R_{800}, PRI_{mod}, ARI_{mod}, Y(NPQ) (r = 0,51...–0,84, p = 0,05). По ряду агрономически ценных признаков выделены образцы к-112 (Местный, Азербайджан) и к-165 (Gartenkresse, Бельгия) как наиболее перспективные для культивирования в условиях светокультуры и дальнейшей селекции. Отмечено совместное изменение признака масса 1 растения и индекса PRI_{mod} у выделенных генотипов, что позволяет сделать вывод о возможности использования оптических показателей не только в качестве инструмента мониторинга состояния растений и прогноза урожая, но и в качестве критерия для выделения перспективных и высокопродуктивных образцов, представляющих интерес для культивирования в условиях светокультуры и дальнейшей генетико-физиологической и селекционной работы.

Выражаем благодарность А.М. Артемьевой (ВИР), любезно предоставившей семена образцов кресс-салата из коллекции ВИР.

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,
e-mail: lehzerina@yandex.ru ✉, yuv_chesnokov@agrophys.ru

Поступила в редакцию 18 марта 2025 года
Принята к публикации 12 мая 2025 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya (*Agricultural Biology*), 2025, V. 60, № 5, pp. 852-865

EVALUATION OF MORPHOLOGICAL, SPECTRAL AND FLUORESCENT CHARACTERISTICS OF GARDEN CRESS (*Lepidium sativum* L.) SAMPLES GROWN UNDER DIFFERENT CONDITIONS

E.M. Ezerina✉, *Yu.V. Chesnokov*

Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdanskii prosp., St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail lehzerina@yandex.ru (✉ corresponding author), yuv_chesnokov@agrophys.ru
ORCID:
Ezerina E.M. orcid.org/0009-0008-8243-2435 Chesnokov Yu.V. orcid.org/0000-0002-1134-0292
The authors declare no conflict of interests
Acknowledgements:
We would like to express our gratitude to A.M. Artemyeva (VIR) who kindly provided the seeds of the garden cress samples from the VIR collection.
Final revision received March 18, 2025 doi: 10.15389/agrobiology.2025.5.852eng
Accepted May 12, 2025

Abstract

Garden cress (*Lepidium sativum* L.) is a promising, precocious, responsive crop of interest to the conditions of light culture. Diagnosis of physiological status is an essential component when growing plants in the field, under controlled and strictly controlled conditions. Among the methods of noninvasive control of the physiological state of plants for regulated agroecosystems, the method of spectral analysis of leaf blades and the fluorescent method are the most effective and widely used. In this work, based on the experiments carried out, correlations of morphological parameters of garden cress samples with various optical indices were established for the first time in conditions of light culture, greenhouse and open ground. The purpose of the study was to study the influence of growing conditions on the morphological characteristics and optical parameters of leaf blades (chlorophyll fluorescence and reflection spectra) of garden cress samples from the VIR collection and to establish correlations of morphological parameters with various optical indexes, as well as to identify highly productive, promising samples of interest for growing in light culture. The objects of the study were 17 samples of garden cress of various origins obtained from the collection of the Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR). Vegetation experiments in strictly controlled conditions of light culture were carried out at the agrobiopolygon of the Agrophysical Research Institute (St. Petersburg) in 2024. The plants were grown by flow hydroponics at a photoperiod of 12, 14, and 16 hours. The plants were grown in pots for a salad line with a volume of 0.1 liters. Morphological description was carried out in the phase of technical ripeness on the 26th-29th day from sowing. Vegetation experiments in a polycarbonate greenhouse were conducted at the Pushkin branch of VIR (St. Petersburg) in the spring (sowing on April 26) and in the open ground (sowing on July 3) in 2024. The growing pattern was the same both in greenhouses and in the field, 5×10 cm. Morphological description was performed on days 28-30. Optical parameters were measured on the leaves of the middle tier of representative plants of each sample. Chlorophyll fluorescence parameters and leaf reflection spectra were recorded on days 23-28 of vegetation using a miniature fiber-optic spectrometric system (Ocean Optics, USA) and a MINI-PAM-II pulsed portable fluorimeter (Heinz Walz GmbH, Germany), respectively. The chlorophyll index ChlRI, the carotenoid-to-chlorophyll ratio index SIPI, the light scattering index R_{800}, the photochemical index PRI, the anthocyanin reflection index ARI, the aging index PSRI, and the pheophytination index NPQI were evaluated. The PRI and ARI indicators were used with modification and designated as PRI_{mod} and ARI_{mod}. The feofetinization index was also used with the addition of a constant (C + NPQI; C = 5) for ease of interpretation and was further designated as NPQI + c. The following parameters obtained as a result of fluorescence analysis were also evaluated: the maximum quantum yield of the Fv/Fm photosystem; the effective quantum yield of the photosystem Y(II); the quantum yield Y(NO); Y(NPQ), characterizing the controlled loss of excitation energy due to heat dissipation. It is shown that the morphological features characterizing the productivity of green crops (plant weight, diameter and height of the rosette, number of leaves) significantly changed in different garden cress samples and under the influence of the growing medium. In the conditions of light culture, the photoperiods that are most favorable for the growth of the green mass of plants were 12 and 16 hours. In addition, with a longer photoperiod of 16 hours, a faster transition to the generative phase was noted than with shorter ones. As a result of comparison with plants grown

in greenhouse and open ground conditions, it was found that in light culture conditions with favorable photoperiods, the samples did not significantly differ in terms of average plant weight, however, the beginning of the transition to flowering was noted in a significantly smaller number of samples. Most of the optical parameters changed significantly under the influence of the "growing conditions" factor, depending on the studied "genotype". There was a significant decrease in the ChlRI index and the PRI_{mod} index when growing samples in the field and in the greenhouse. There was a significant increase in the R_{800} index in agrobiopoligon conditions, as well as a significant increase in the SIPI index in light culture conditions with a less favorable photoperiod. Constant close and average correlations were found between morphological features characterizing productivity (rosette diameter, height of 1 plant, number of leaves, weight of 1 plant) and optical indicators R_{800}, PRI_{mod}, ARI_{mod}, Y(NPQ) ($r = 0.51...–0.84$, $p = 0.05$). Samples k-112 (Local, Azerbaijan) and k-165 (Gartenkresse, Belgium) have been identified for a number of agronomically valuable traits as the most promising for cultivation in the conditions of light culture and further breeding. A joint change in the plant mass trait and the PRI_{mod} index was noted in the selected genotypes. This allows us to conclude that optical indicators can be used not only as a tool for monitoring plant condition and crop forecasting, but also as a criterion for identifying promising and highly productive samples of interest for cultivation in light culture and further genetic, physiological and breeding work.

Keywords: garden cress, *Lepidium sativum* L., light culture, field, greenhouse, reflection spectra, chlorophyll fluorescence, non-invasive methods.

REFERENCES

1. Soldatenko A.V., Pivovarov V.F., Razin A.F., Meshcheryakova R.A., Razin O.A., Surikhina T.N., Telegina G.A. *Ovoshchi Rossii*, 2020, 2: 3-11 (doi: 10.18619/2072-9146-2020-2-3-11) (in Russ.).
2. Artemyeva A.M., Sinyavina N.G., Panova G.G., Chesnokov Yu.V. Biological features of *Brassica rapa* L. vegetable leafy crops when growing in an intensive light culture. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya* [*Agricultural Biology*], 2021, 56(1): 103-120 (doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.103rus).
3. Pinchuk E.V., Bespal'ko L.V., Kozar' E.G., Balashova I.T., Sirota S.M., Shevchenko T.E. *Ovoshchi Rossii*, 2019, 3: 45-53 (doi: 10.18619/2072-9146-2019-3-45-53) (in Russ.).
4. Vazifeh S., Kananpour P., Khalilpour M., Eisalou S.V., Hamblin M.R. Anti-inflammatory and immunomodulatory properties of *Lepidium sativum*. *BioMed Research International*, 2022, 2022(1): 3645038 (doi: 10.1155/2022/3645038).
5. Kurina A.B., Zheleznova K.O., Solovieva A.E., Sinyavina N.G., Panova G.G., Artemyeva A.M. Morphological and biochemica variability of VIR garden cress (*Lepidium sativum* L.) collection under intensive light culture. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya* [*Agricultural Biology*], 2023, 58(5): 889-901 (doi: 10.15389/agrobiology.2023.5.889rus).
6. Sinyavina N.G., Kochetov A.A., Mirskaya G.V., Egorova K.V., Rushina N.A., Kocherina N.V., Artem'eva A.M., Panova G.G., Chesnokov Yu.V. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Agrofizicheskiy institut: 90 let na sluzhbe zemledeliya i rastenievodstva»* [Proc. Int. Conf. «Agrophysical Institute: 90 years serving agriculture and plant growing»]. St. Petersburg, 2022: 315-321 (in Russ.).
7. Kulchin Y.N., Kholin A.S., Kozhanov S.O., Subbotin E.P., Kovalevsky K.V., Subbotina N.I., Gomolsky A.S. The *Eruca sativa* PSII operating efficiency under different monochromatic light. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2024, 16(2): 50-69 (doi: 10.12731/2658-6649-2024-16-2-828).
8. Kulchin Y.N., Bulgakov V.P., Subbotin E.P., Kholin A.S., Subbotina N.I. Monochromatic LEDs effect on rocket (*Eruca sativa*. Mill.) morphogenesis and productivity. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022, 86: S114-S118 (doi: 10.3103/S1062873822700502).
9. 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, 16(9): e0257745 (doi: 10.1371/journal.pone.0257745).
10. Arena D., Ammar H.B., Major N., Kovačević T.K., Ban S.G., Treccarichi S., Scalzo R.L., Branca F. Light use efficiency of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) and rocket (*Eruca sativa* L.) during the initial plant growth stages. *Scientia Horticulturae*, 2024, 336: 113408 (doi: 10.1016/j.scienta.2024.113408).
11. Fedorenko M.P., Yankovets Ya.A. *Universum: khimiya i biologiya*, 2021, 8(86): 24-26 (in Russ.).
12. Egorov M.Yu., Fedorova G.S. *Vestnik NGIEI*, 2023, 8(147): 56-73 (in Russ.).
13. Ajdanian L., Babaei M., Aroiee H. The growth and development of cress (*Lepidium sativum*) affected by blue and red light. *Heliyon*, 2019, 5(7) (doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02109).
14. Chesnokov Yu.V., Kanash E.V., Mirskaya G.V., Kocherina N.V., Rusakov D.V., Lohwasser U., Börner A. QTL mapping of diffuse reflectance indices of leaves in hexaploid bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Russian Journal of Plant Physiology*, 2019, 66(1): 77-86 (doi: 10.1134/S1021443719010047).

15. Su P., Ding S., Wang D., Kan W., Yuan M., Chen X., Tang C., Hou J., Wu L. Plant morphology, secondary metabolites and chlorophyll fluorescence of *Artemisia argyi* under different LED environments. *Photosynthesis Research*, 2024, 159(2): 153-164 (doi: 10.1007/s11120-023-01026-w).
16. Kaniszewski S., Kowalski A., Dysko J., Agati G. Application of a combined transmittance/fluorescence leaf clip sensor for the nondestructive determination of nitrogen status in white cabbage plants. *Sensors*, 2021, 21(2): 482 (doi: 10.3390/s21020482).
17. Katuwal K.B., Yang H., Huang B. Evaluation of phenotypic and photosynthetic indices to detect water stress in perennial grass species using hyperspectral, multispectral and chlorophyll fluorescence imaging. *Grass Research*, 2023, 3(1) (doi: 10.48130/GR-2023-0016).
18. Moustaka J., Moustakas M. Early-stage detection of biotic and abiotic stress on plants by chlorophyll fluorescence imaging analysis. *Biosensors*, 2023, 13(8): 796 (doi: 10.3390/bios13080796).
19. Burinin D.A., Smirnov A.A., Proshkin Yu.A., Kachan S.A., Dolgalev A.P. *Agroinzheneriya*, 2022, 24(6): 70-75 (doi: 10.26897/2687-1149-2022-6-70-75) (in Russ.).
20. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing Environment*, 2002, 81: 337-354 (doi: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X).
21. Gamon J.A., Serrano L., Surfus J.S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 1997, 112(4): 492-501 (doi: 10.1007/s004420050337).
22. Merzlyak M.N., Solovchenko A.E., Smagin A.I., Gitelson A.A. Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and techniques for non-destructive assessment. *J. Plant Physiology*, 2005, 162(2): 151-160 (doi: 10.1016/j.jplph.2004.07.002).
23. Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Rakitin V.Y. Non destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 1999, 106(1): 135-141 (doi: 10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x).
24. Barnes J.D., Balaguer L., Manrique E., Elvira S., Davison A.W. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1992, 32(2): 85-100 (doi: 10.1016/0098-8472(92)90034-Y).
25. Kitajima M., Butler W.L. Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1975, 376(1): 105-115 (doi: 10.1016/0005-2728(75)90209-1).
26. Genty B., Briantais J.M., Baker N.R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1989, 990(1): 87-92 (doi: 10.1016/S0304-4165(89)80016-9).
27. Genty B., Harbinson J., Cailly A.L., Rizza F. Fate of excitation at PS II in leaves: the non-photochemical side. *The Third BBSRC Robert Hill Symposium on Photosynthesis*. Sheffield, UK, 1996: 28.
28. Macioszek V.K., Sobczak M., Skoczowski A., Oliwa J., Michlewska S., Gapińska M., Ciereszko I., Kononowicz A.K. The effect of photoperiod on necrosis development, photosynthetic efficiency and 'Green Islands' formation in *Brassica juncea* infected with *Alternaria brassicicola*. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, 22(16): 8435 (doi: 10.3390/ijms22168435).
29. Gavhane K.P., Hasan M., Singh D.K., Kumar S.N., Sahoo R.N., Alam W. Determination of optimal daily light integral (DLI) for indoor cultivation of iceberg lettuce in an indigenous vertical hydroponic system. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 10923 (doi: 10.1038/s41598-023-36997-2).
30. Gromova O.A., Ezerina E.M., Solov'eva A.E., Kocherina N.V., Ulimbashev A.M., Chesnokov Yu.V. *Agrofizika*, 2024, 2: 30-38 (doi: 10.25695/AGRPH.2024.02.04) (in Russ.).
31. Zheleznova K.O., Solov'eva A.E., Kurina A.B. *Tezisi Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aromaticheskie i lekarstvennie rasteniya: introduktsiya, selektsiya, agrotekhnika, biologicheski aktivnie veshchestva, vliyanie na cheloveka»* (Yalta, 2021 god) [Proc. Int. Conf. «Aromatic and medicinal plants: introduction, selection, agricultural technology, biologically active substances, impact on humans» (Yalta, 2021)]. Simferopol', 2021: 43 (in Russ.).
32. Egorova K.V., Sinyavina N.G., Vertebniy V.E., Khomyakov Yu.V., Chesnokov Yu.V. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Tendentsii razvitiya agrofiziki: ot aktual'nikh problem zemledeliya i rastenievodstva k tekhnologiyam budushchego»* [Proc. Int. Conf. «Trends in the development of agrophysics: from current problems of agriculture and plant growing to technologies of the future»]. St. Petersburg, 2021: 304-309 (in Russ.).