

06

Свет и растение: основы оптимизации световой среды в регулируемой агроэкосистеме

© Г.Г. Панова, Т.Э. Кулешова, О.Р. Удалова, Н.Г. Синявина, Е.Н. Волкова, М.В. Архипов, Ю.В. Хомяков, Н.С. Прияткин, А.С. Галушко, А.С. Журавлева, Е.В. Канаш

Агрофизический научно-исследовательский институт,
195220 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: gaiane@inbox.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2026 г.

В окончательной редакции 14 июля 2026 г.

Принято к публикации 16 июля 2026 г.

Продemonстрированы результаты оценки в регулируемой агроэкосистеме реакции различных сельскохозяйственных культур, их сортообразцов на формируемые условия световой среды, включая спектральный состав, интенсивность света, фотопериод при оптимизированных остальных условиях жизнеобеспечения растений. На основе анализа изменений морфофизиологических характеристик и показателей продуктивности ряда овощных культур, а также качества их растительной продукции показано, что полноспектральные светодиоды, имитирующие солнечный свет с учетом суточных особенностей распространения солнечных лучей, перспективны для получения продукции томата *Solanum lycopersicum* L., и, как ранее нами показано, кочанного салата (*Lactuca sativa* var. *longifolia* Lam) и редиса (*Raphanus sativus* L.) в условиях светокультуры. В частности, увеличение доли синего света до 24% при одновременном снижении доли красного света до 29% в созданном нами светодиодном светильнике относительно их долевого соотношения в спектре наиболее распространенных в тепличном агропроизводстве натриевых ламп способствует более эффективному снижению потерь фотосинтетически высокоэффективной радиации синего и красного диапазонов, достигающих листьев, и обеспечивает, в конечном итоге, значимое увеличение урожая корнеплодов редиса, кочанного салата, числа плодов томата наряду с повышением качества и безопасности их продукции. В экспериментах по оценке влияния интенсивности света в области фотосинтетически активной радиации на сортообразцы листового салата (*Lactuca sativa* L.) оптическими методами выявлены особенности изменений процессов усвоения световой энергии и синтеза фотосинтетических пигментов у сортов салата с зеленой и с красной или красноватой окраской листьев. Проведенная оценка сортовой реакции у образцов сои культурной (*Glycine max* (L.) Merrill) разных групп спелости на длительность фотопериода в регулируемой агроэкосистеме позволила распределить их по степени фотопериодической чувствительности и рекомендовать 14-часовой фотопериод для ускоренного размножения ценных генотипов в условиях интенсивной светокультуры, а 18-часовой фотопериод, как „контрастирующий фон“, — для оценки степени фотопериодической чувствительности образцов сои при селекции новых сортов для различных регионов России.

Ключевые слова: регулируемая агроэкосистема, спектральный состав, интенсивность, фотопериод, сельскохозяйственные культуры, взаимодействие „генотип–среда“.

DOI: 10.61011/JTF.2026.11.63782.53-26

Введение

Разработка новых инновационных систем выращивания растений и получения высоких урожаев качественной растительной продукции остается актуальной задачей современности. В связи с этим приоритетными становятся исследования, направленные на решение вопросов многомерной оптимизации среды обитания сельскохозяйственных растений в таких системах, технологий их выращивания, создания высокоэффективных сортов, адаптированных для сооружений с полностью регулируемыми условиями [1–4].

Наряду с корнеобитаемой и воздушной средами, формирование и оптимизация световой среды является неотъемлемой частью успешного и высокоэффективного процесса выращивания сельскохозяйственных растений с учетом их генетико-физиологических особенностей и

потребностей. Световая среда растений, как известно, это поле оптического излучения в занятой растениями части пространства, определяемое естественным или искусственным освещением в культивационном помещении, а также фитоценозом [5,6]. От светового режима, уровня освещенности, спектрального состава света, равномерности распределения светового потока по полезной площади, занятой растениями в защищенном грунте, зависят морфофизиологические характеристики выращиваемых культур, степень реализации их потенциала продуктивности, а также качество получаемой растительной продукции, особенно в условиях использования только искусственных источников света [7–10].

Многоярусное производство растений в условиях ограниченного пространства требует использования источников света с малой теплоотдачей и высокой конверсией энергии в фотосинтетически активную ради-

ацию (ФАР) [11]. Среди искусственных источников света (люминесцентные, газоразрядные натриевые и металлогалогенные лампы, светодиодные светильники), используемых в настоящее время для производства растительной продукции, светодиоды обладают рядом преимуществ, такими, как длительный срок службы, высокая эффективность преобразования электроэнергии, меньшее тепловыделение и низкая стоимость [12–15]. Однако наиболее важным фактором для растениеводства защищенного грунта является то, что с помощью светодиодов путем комбинирования разных длин волн можно формировать различные спектры освещения, обеспечивая оптимальное качество света в зависимости от вида культуры и стадии ее развития [16].

В научной литературе показано, что при монохроматическом свете дефицит определенных длин волн может ухудшить развитие растений [17]. Подбор оптимального широкополосного спектра световой среды, регулирующего формирование растений, видоспецифичен, и представляется наиболее эффективным путем развития светокультуры [18].

Недавние исследования показали, что светодиодные светильники со спектром излучения, приближенным к естественному солнечному освещению в видимой области, перспективны для применения в системах выращивания растений в контролируемых условиях, так как солнечный спектр содержит в себе все функциональные длины волн, необходимые для роста растений [19–24]. Так, использование широкополосного излучения в области ФАР способствовало повышению массы растений и средней скорости фотосинтеза у земляники [22], урожая плодов у томата [20], площади листьев и биомассы у салата [23], показателей роста у редиса, особенно его корневой системы [24].

Однако роль и механизмы влияния всей области фотосинтетически активной радиации на выращиваемые в системах с контролируемыми условиями (Controlled environment agriculture — CEA) культуры, включая различные соотношения длин волн в спектре, еще предстоит выяснить. Это необходимо для создания энерго- и ресурсосберегающих адаптивных производственных технологий, основанных на детальном изучении взаимодействия „генотип–среда“ и выявлении биологического потенциала продуктивности для различных культур и сортов, а также возможностей управления ими.

В Агрофизическом научно-исследовательском институте, начиная с года его основания (1932) и по настоящее время, развивается экспериментальная и промышленная светокультура на основе системных исследований реакций растений на физически моделируемые условия среды обитания в полностью изолированных от солнечного света помещениях агробиополигона [5,6,25–35]. Разработаны энергосберегающие световые модули с использованием различных источников света, светотехнические методы формирования объемной световой среды, фотобиологические приемы воздействия регуляторного плана на растения, такие как варьирование фотопериода,

световые разрывы темнового периода, в том числе красным светом, спектральное распределение облученности в области 200–40 000 nm, облученность в области ФАР; регулирование тепловой составляющей потока оптического излучения (в пределах 3000–40 000 nm) с учетом вида, сорта, гибрида растений, облученности ФАР, влагообеспеченности растений; кратковременное воздействие низкоинтенсивной УФ-С, УФ-В или УФ-А радиацией для стимуляции роста, накопления биомассы растений, улучшения качества растительной продукции, регуляции численности и состава микроорганизмов филлопланы и ризопланы.

На основе полученных знаний и анализа литературы выдвинута гипотеза, что наиболее привычным для растений и оптимальным с точки зрения функционального влияния на растительные культуры является формирование спектрального состава света, приближенного к солнечному освещению, содержащему в себе все функциональные длины волн — как для работы фотосинтетического аппарата с максимумами поглощения света в синей и красной областях спектра, так и для реализации вторичных процессов — от аккумуляции энергии до активации защитных механизмов в растениях.

В соответствии с данной гипотезой на основе эффективных серийных светодиодов последнего поколения нами созданы источники света, по спектральному составу имитирующие солнечное освещение в разные периоды его суточного цикла. О влиянии источников света, моделирующих солнечный спектр, на сельскохозяйственные культуры информации в литературе мало [19,22,23,36–38]. Также недостаточно системных исследований реакций на уровне генотип–световая среда, включая спектральный состав, интенсивность светового потока, равномерность его распределения, фотопериод. Разные сорта в пределах одной культуры могут существенно различаться по степени чувствительности к световым условиям выращивания [2,33,35,39,40]. Это особенно надо учитывать при разработке развивающегося в настоящее время направления по созданию программно-управляемого динамического освещения, формирующего световую среду с изменяемыми на протяжении вегетации растений значениями ее параметров: спектрального состава, интенсивности, светового режима [9,40–43]. Знание особенностей взаимодействия „генотип–среда“ для конкретных сортов (образцов) имеет большое значение, так как позволяет подбирать оптимальные условия для их выращивания, регулировать продолжительность вегетационного периода и переход к цветению, стимулировать накопление ценных биохимических соединений, способствует ускоренному размножению ценных генотипов и получению семенного материала высокого качества, и др.

Оптические методы неинвазивного контроля, позволяющие проводить мониторинг роста и экспресс-оценку состояния растений и их реакций на применяемые воздействия в системе „генотип–среда“, могут служить одним из действенных механизмов оптимизации технологий выращивания различных сельскохозяйственных

культур в СЕА [44–48]. Оптические свойства листьев, главным образом, определяются содержащимися в их тканях фотосинтетическими пигментами (хлорофилл *a*, *b*, каротиноиды), но также зависят от структуры листа, наличия и концентрации нефотосинтетических соединений (антоцианы, флавонолы) и воды. Оптические свойства листьев являются важнейшей характеристикой растений, позволяющей оценить количество поглощенной фотосинтетически активной радиации, интенсивность фотосинтеза и, в итоге, физиологическое состояние, и прогнозировать продуктивность растения и посева в целом [46,47]. Качественные и количественные изменения в содержании пигментов неизбежно сопровождаются изменением оптических свойств листьев растений, что позволяет исследовать механизмы физиологических реакций, устойчивости и адаптации, знание которых необходимо при разработке технологий оптимизации продукционного процесса.

Однако связь между световой средой и физиологическим состоянием растений, их продуктивностью, спектральными характеристиками диффузного отражения листьев, для многих культур еще мало изучена.

Цель работы — оценка особенностей реакции на уровне генотип–среда у различных сельскохозяйственных культур в регулируемой агроэкосистеме на формируемые условия световой среды, включая спектральный состав, интенсивность света, фотопериод, для их оптимизации, повышения эффективности продукционного процесса, улучшения качества растительной продукции и снижения затрат на ее производство.

1. Материалы и методы

1.1. Место проведения НИР, объект и предмет исследований

Исследовательская работа проведена в серии лабораторных, вегетационных экспериментов на базе агробиополигона ФГБНУ АФИ в реализуемой на нем регулируемой агроэкосистеме.

Объектом исследований служили сельскохозяйственные культуры: овощные листовые — салат (*Lactuca sativa* L.) из коллекции ФГБНУ ФИЦ ВИР имени Н.И. Вавилова: листовые салаты сортов Тайфун и Джаггер с зеленой окраской листьев, листовые салаты сортов Лолло Росса, Бразильский карнавал с красной окраской листьев и дуболистный салат сорта Розалин красноватого цвета с антоциановой окраской листьев; овощные плодовые — томат (*Solanum lycopersicum* L.) сорта Наташа из коллекции ФГБНУ ФНЦО, детерминантный, адаптированный для условий светокультуры; зернобобовые — соя (*Glycine max* (L.) Merrill) сортов Баргузин, Гном 1809 ТД, Ирбис, Славия, Олимпия, Вилана, различающиеся по скорости развития и фотопериодической реакции (селекция ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК им. В.С. Пустовойта).

Предметом исследований у растений явились оптические свойства их листьев, морфофизиологические харак-

теристики, а также показатели продуктивности и качества получаемой продукции при действующем факторе световой среды растений, а именно: спектральный состав света, интенсивность светового потока, фотопериод. Фоновые параметры воздушной и корнеобитаемой среды поддерживали в благоприятных диапазонах значений для выращиваемых растений.

1.2. Методика проведения исследований

1.2.1. Методика проведения исследований в вегетационных экспериментах по изучению влияния спектрального состава светодиодного освещения на динамику роста и морфометрические показатели растений на примере плодовых овощных культур: томата (*Solanum lycopersicum* L.)

1.2.1.1. Источники оптического излучения

Для формирования световой среды, отличающейся плотностью потока ФАР в различных спектральных диапазонах излучения, были применены 4 источника света (рис. 1): натриевые лампы высокого давления ДНаЗ-250 (ООО „Рефлак“, Москва, Россия) в качестве эталонного контроля, а также три варианта созданных в ФГБНУ АФИ оригинальных светодиодных светильников, имитирующие солнечное освещение в различное время суток:

1) АФИ-3000 — светодиодный светильник с цветовой температурой 3000 К. Имитирует спектр солнца, находящегося у горизонта;

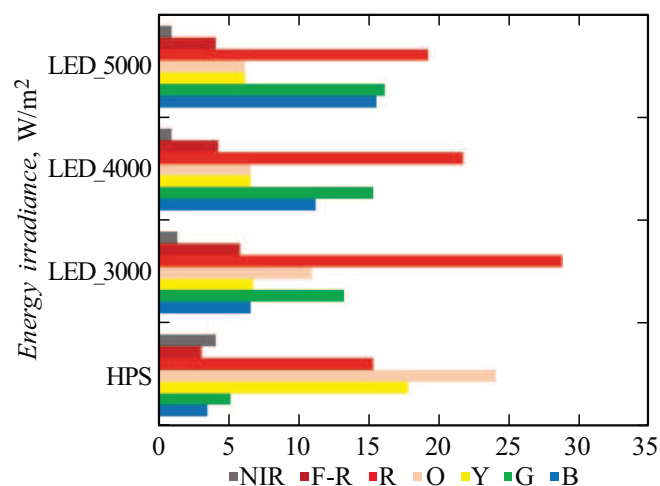


Рис. 1. Энергетическая облученность падающей радиации от светодиодных светильников и ламп ДНаЗ и ее распределение по диапазонам ФАР и ближней инфракрасной области. Спектральные диапазоны формируемой световой среды: NIR — ближняя инфракрасная радиация (751–800 nm), F-R — дальний красный свет (701–750 nm), R — красный свет (621–700 nm), O — оранжевый свет (591–620 nm), Y — желтый свет (566–590 nm), G — зеленый свет (501–565 nm), B — синий свет (400–500 nm).

2) АФИ-4000 — светодиодный светильник с цветовой температурой 4000 К. Имитирует спектр солнца, приближенный к облачному дневному послеполуденному освещению;

3) АФИ-5000 — светодиодный светильник с цветовой температурой 5000 К. Имитирует спектр солнца в зените.

В потоке излучения трех светодиодных светильников содержится существенно больше, чем в лампах ДНаЗ, радиации синего (400–500 nm) и красного (621–700 nm) диапазонов, характеризующихся наиболее высокой эффективностью фотосинтеза. Также в спектре АФИ-светильников содержится больше радиации зеленого диапазона (501–565 nm). В свою очередь, основную долю в PPFD-ламп ДНаЗ (64 %) составляет радиация желтого (566–590 nm) и оранжевого (591–620 nm) спектральных диапазонов. Для сравнения PPFD-светильников АФИ-3000, АФИ-4000 и АФИ-5000 в желто-оранжевом диапазоне равна 27 %, 24 % и 21 %. Также в сравнении с лампами ДНаЗ светодиодные светильники излучают больше радиации дальнего красного диапазона и меньше ближнего инфракрасного.

1.2.1.2. Методика культивирования растений томата *Solanum lycopersicum* L.

Растения томата сорта Наташа (селекция ФГБНУ ФНЦО для светокультуры) выращивали методом тонкослойной паноупики [49]. В качестве питательного раствора (ПР) использовали раствор Кнопа [50]. Плотность посадки — по 24 растения на m^2 полезной площади вегетационной светостановки.

Изучение влияния спектрального состава указанных выше источников света на растения томата осуществляли при облученности $(70 \pm 5) \text{ W/m}^2$ ФАР. Продолжительность светового периода — 16 h. Температуру воздуха поддерживали в пределах $(+22)^\circ\text{C}-(+24)^\circ\text{C}$ днем и $(+18)^\circ\text{C}-(+20)^\circ\text{C}$ ночью; относительную влажность воздуха — на уровне 65 %–75 %.

На протяжении вегетационных периодов проводили фенологические наблюдения. Уборку растений осуществляли на 116 сутки. Повторность опыта — 10 растений в каждом его варианте.

1.2.2. Методика проведения исследований в вегетационных экспериментах по оценке морфофизиологических реакций листового салата (*Lactuca sativa* L.) различных сортов на интенсивность светового потока в области ФАР при выращивании растений в регулируемых условиях интенсивной светокультуры

Растения салата выращивали методом тонкослойной паноупики [49]. В качестве ПР использовали раствор Кнопа [50]. Плотность посадки — 28 растений на m^2 .

Формирование световой среды во время выращивания растений салата осуществляли с помощью разных источников света: газоразрядных натриевых ламп ДНаЗ-400

или наиболее близких по спектру к ним светодиодных светильников АФИ-3000, поддерживая энергетическую облученность равной (45 ± 5) , (75 ± 5) , $(105 \pm 5) \text{ W/m}^2$ ФАР в течение всей вегетации. Продолжительность светового периода — 14 h/day. Температуру воздуха поддерживали в пределах $(+20)^\circ\text{C}-(+22)^\circ\text{C}$ днем и $(+16)^\circ\text{C}-(+18)^\circ\text{C}$ ночью; относительную влажность воздуха — на уровне 65 %–75 %.

На протяжении вегетационных периодов проводили фенологические наблюдения. Уборку растений осуществляли на 28 сутки. Повторность опыта — 14 растений в каждом его варианте.

1.2.3. Методика проведения исследований в вегетационных экспериментах по оценке влияния фотопериода на морфофизиологические характеристики растений, формирование их продуктивности на примере сортообразцов сои культурной (*Glycine max* (L.) Merrill) в условиях интенсивной светокультуры

Фотопериодическую чувствительность шести перспективных сортов сои селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК им. В.С. Пустовойта изучали при выращивании на 14-часовом и 18-часовом фотопериоде. Краткая характеристика сортов сои, различающихся по скороспелости и продолжительности вегетации, представлена в табл. 1. О свойствах наиболее раннеспелого сорта Баргузин имеется также подробная информация в [51].

Сухие семена сои высевали в вегетационные сосуды объемом 4 л, наполненные субстратом Агробалт С (ООО „Пиндструп“, Московская обл.), pH = 6.2. Растения выращивали на агробиополигоне ФГБНУ АФИ в вегетационно-облучательной установке, под лампами ДНаЗ-400 (производитель — ООО „Рефлекс“, Россия) с возможностью регулирования высоты осветительного блока. Облученность растений на уровне верхних листьев — $(70 \pm 5) \text{ W/m}^2$ в области ФАР.

Подкормку растений раствором Кнопа [50] осуществляли два раза в неделю. Влажность субстрата поддерживали на уровне 60 %–70 % ПВ, влажность воздуха — 60 %–70 %, температуру — $(+22)^\circ\text{C}-(+24)^\circ\text{C}$ днем и $(+18)^\circ\text{C}-(+20)^\circ\text{C}$ ночью. Повторность опыта — 20 растений в каждом его варианте.

1.2.4. Методы анализа оцениваемых характеристик растений

При уборке растений томата и салата учитывали высоту растений, число, сырую и сухую массу, сухое вещество листьев, корней, плодов, площадь листовой поверхности и другие индивидуальные показатели структуры урожая.

В течение вегетации сортообразцов сои фиксировали этапы прохождения фаз онтогенеза, осуществляли контроль за состоянием растений. Уборку проводили

Таблица 1. Краткая характеристика сортов сои для широты 45°, Краснодар (по данным оригинатора — ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, <https://vniimk.ru/production/sorta-soi/?ysclid=mgoyhtoqoj392764881>)

Сорт	Группа спелости	Длина периода вегетации сутки (day)	Высота растений, см	Высота прикрепления нижнего боба, см	Содержание белка, %	Масса 1000 зерен, g	Год включения в Госсорт-реестр
Баргузин	Очень ранний	91–98	85–100	13–15	41	130	2022
Вилана	Средне-спелый	115–120	100–115	14–16	42	140–160	1999
Гном 1809 ТД	Ранний	100–105	25–45	—	44	275–290	—
Ирбис	Ранний	104–108	95–115	14–16	46	155–175	2019
Олимпия	Ранний	104–110	80–90	13–15	42	140–160	2016
Славия	Ранний	103–108	110–125	15–16	43	135–175	2009

в момент полного высыхания растений, учитывали основные показатели — высоту растений, число узлов на главном побеге, длину междоузлий, число боковых побегов, число бобов, число семян, узел первого цветка, высоту прикрепления нижнего боба, массу бобов на растение, массу семян и массу створок на растение. На основе полученных данных рассчитывали показатели среднее число семян на один боб, средняя масса одного боба, масса 1000 семян, и индекс аттракции (ИА) — отношение массы семян к массе створок. Также оценивали толщину и прочность стебля, и степень устойчивости к растрескиванию.

У сортообразцов салата наряду с морфометрическими характеристиками проводили измерения оптических показателей на листьях среднего яруса растений перед их уборкой — на 26–27 день вегетации от посева семенами. Регистрацию спектров отражения листьев и параметров флуоресценции хлорофилла проводили с помощью миниатюрной оптоволоконной спектрометрической системы фирмы „Ocean Optics“ (США) и импульсного портативного флуориметра MINI-PAM-II (Walz, Германия) соответственно. Для каждого изучаемого растения было зарегистрировано не менее 15 спектров отражения листовых пластинок и 5 измерений индукции флуоресценции хлорофилла *a*. Расчет спектральных индексов производили с использованием программы Excel, а параметров флуоресценции хлорофилла *a* — автоматически, при помощи программного обеспечения WinControl-3 (Walz, Германия).

Для определения физиологического статуса вегетирующих растений нами были использованы спектральные индексы, характеризующие емкость фотосинтетического аппарата — индекс хлорофилла $ChlRI = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$ [52], а также эффективность его работы — индекс соотношения каротиноидов к хлорофиллу $SIPi = (R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$ [53]; индекс отражения каротиноидов — $CAR = 1/R_{510} - 1/R_{550}$ [54]; показатель рассеяния света внутри листа — R_{800} [52]; фотохимический индекс $PRI = (R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$ [55]; индекс отражения антоцианов $ARI = [(1/R_{550}) - (1/R_{700})] \cdot R_{750}$ [56].

Показатели PRI и ARI в настоящей работе использовались с модификацией $((C1 - PRI) \cdot C2; C1 = 0.1; C2 = 10 \text{ и } C + ARI; C = 0.9)$, и обозначаются PRI_{mod} и ARI_{mod} соответственно. Во всех формулах для расчета величины индексов отражения R цифры в нижнем регистре означают длину волны отраженной радиации.

Показатели флуоресцентного анализа: Fv/Fm — максимальный квантовый выход фотосистемы II (где Fv — переменная флуоресценция, разница между максимальной и минимальной флуоресценцией, Fm — максимальная флуоресценция) [57], $Y(II)$ — эффективный фотохимический выход ФС II, характеризующий вероятность того, что энергия поглощенного кванта света инициирует химическую реакцию [58]; $Y(NO)$ — нерегулируемые потери энергии возбуждения, включая рассеяние тепла и флуоресцентное излучение [59]; $Y(NPQ)$ — коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции, рассчитываемый согласно уравнению Штерна–Фольмера и характеризующий регулируемые потери энергии возбуждения за счет диссипации тепла [59]; qP — коэффициент фотохимического тушения флуоресценции на свету [60]. Все перечисленные параметры флуоресценции хлорофилла и их расчетные формулы являются общепринятыми и широко используются для оценки эффективности работы фотосинтетического аппарата.

Биохимические показатели и качество получаемой продукции растений определяли в аккредитованной испытательной лаборатории АФИ, по общепринятым методикам [61–63].

1.2.5. Методы статистической обработки экспериментальных данных

Статистическую обработку всех полученных данных выполняли с помощью программы STATISTICA v.10.0 („StatSoft Inc.“, США). Определяли среднее значение каждого показателя (M), стандартную ошибку среднего ($\pm SEM$), доверительный интервал, коэффициенты корреляции изучаемых показателей. Различия между вариантами считали достоверными при $p \leq 0.05$.

Таблица 2. Показатели роста растений томата (сорт Наташа) при выращивании под источниками света с различным спектральным составом в регулируемых условиях агробиополитона

Источник света	Растение											Площадь листьев, dm ²
	Высота, см	Листья			Стебли				Корни			
		Сырая масса, g	Сухая масса, g	Сухое вещество, %	Число, шт.	Сырая масса, g	Сухая масса, g	Сухое вещество, %	Сырая масса, g	Сухая масса, g	Сухое вещество, %	
ДНаЗ-400	26.4± 2.4	273.1± 44.1	26.0± 4.2	9.5± 0.3	12.6± 2.3	98.3± 7.7	12.3± 2.2	12.6± 0.2	109.1± 9.1	7.5± 0.5	6.9± 0.2	126.1± 20.4
АФИ-3000	22.9± 2.5	175.8*± 40.2	21.8± 5.1	12.4*± 0.3	15.6± 2.6	84.2± 8.2	12.4± 1.7	14.7*± 0.2	111.4± 7.8	8.1± 0.4	7.2± 0.2	76.7*± 7.5
АФИ-4000	20.9*± 2.0	205.2± 34.5	24.1± 4.0	11.7*± 0.3	20.7*± 5.0	101.5± 8.2	14.5± 3.6	14.3*± 0.3	128.0± 10.4	10.7*± 2.5	8.4*± 0.3	89.5*± 5.0
АФИ-5000	25.1± 2.9	237.5± 59.5	26.0± 6.5	11.0*± 0.2	17.0*± 2.0	105.6± 8.4	15.7± 3.4	14.9*± 0.2	104.7± 8.6	12.5*± 2.4	12.0*± 0.2	88.8*± 8.2

Примечание: * значение достоверно отличается от эталонного контроля (вариант с лампами ДНаЗ-400) на 5%-ном уровне значимости.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Изучение влияния спектрального состава светодиодного освещения на динамику роста и морфофизиологические показатели растений на примере представителей плодовой овощной культуры: томата (*Solanum lycopersicum* L.)

Ранее нами на примере представителей листовых и корнеплодных овощных культур (кочанный салат, редис) проведены исследования изменений морфофизиологических характеристик и показателей продуктивности их сортов, адаптированных к условиям светокультуры, а также качества растительной продукции под влиянием используемых в настоящей работе источников света с различным спектральным составом (лампы ДНаЗ-400, светодиодные светильники АФИ-3000, АФИ-4000 и АФИ-5000), и показано, что увеличению урожая кочанного салата [64], корнеплодов редиса [38] способствует наиболее равномерное из исследованных распределение интенсивности излучения по основным диапазонам ФАР в области синего (400–500 nm), зеленого (500–600 nm), красного (600–700 nm) света в соотношении 25%:38%:37% в спектре светодиодного светильника АФИ-5000. Установлено, что при вегетации растений в световой среде, моделирующей естественное освещение при расположении солнца в зените, существенно снижается количество отраженной радиации синего и красного диапазонов, в которых эффективность фотосинтеза, оцениваемая по оптическим параметрам листьев и содержанию фотосинтетических пигментов, наиболее высока. Так, анализ спектров диффузного отражения листьев и расчет на их основе вегетационных индексов отражения на примере растений редиса выявил, что под светодиодными светильниками фор-

мируется фотосинтетический аппарат, адаптированный к условиям интенсивного искусственного освещения с высокой долей синей радиации в спектре ФАР, что позволяет избежать фотоповреждения фотосистемы II [38].

Сравнительная оценка влияния указанных выше источников света на плодовую овощную культуру — томат сорта Наташа, адаптированного к условиям светокультуры, показала:

— наиболее высокие растения формировались под лампами ДНаЗ-400 и светодиодным светильником АФИ-5000 (табл. 2);

— площадь листьев и содержание хлорофиллов в них в вариантах со светодиодными светильниками сходно и достоверно ниже по сравнению с таковыми в варианте с лампами ДНаЗ-400 (табл. 2 и 3);

— несмотря на то, что сырая масса листьев под светодиодными светильниками имеет несколько более низкие значения (тенденции под АФИ-4000 и АФИ-5000 и достоверно — под АФИ-3000) по сравнению с таковыми под лампами ДНаЗ, а сырая масса стеблей и корней достоверно не различается в указанных вариантах опыта, сухая масса листьев не имеет достоверных различий между вариантами, сухая масса стеблей — в виде тенденции, а корней — достоверно увеличивается под светильниками АФИ-4000 и АФИ-5000 (табл. 2). Очевидно, такие отличия в сухой массе между вариантами связаны с достоверно более высокими значениями сухого вещества в листьях, стеблях и корнях растений под светодиодными светильниками (табл. 2);

— более высокое число стеблей у растений под светодиодными светильниками, особенно выраженное в вариантах с АФИ-4000 и АФИ-5000 (табл. 2);

— проявление, судя по элементному составу листьев и плодов томата, выраженной тенденции или

Таблица 3. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений томата (сорт Наташа) при выращивании под источниками света с различным спектральным составом в регулируемых условиях агробиополигона

Показатели	Источник света			
	ДНаЗ-400	АФИ-3000	АФИ-4000	АФИ-5000
Хлорофилл А, mg/100 g н.в.	96.73 ± 4.84	65.26* ± 3.26	68.44* ± 3.42	68.88* ± 3.44
Хлорофилл В, mg/100 g н.в.	38.24 ± 1.91	25.63* ± 1.28	33.01* ± 1.65	26.88* ± 1.34
$\sum a + b$, mg/100 g н.в.	135.02 ± 6.75	90.89* ± 4.64	101.45* ± 5.07	95.76* ± 4.79
Каротиноиды, mg/100 g н.в.	44.84 ± 2.24	20.02* ± 1.00	20.77* ± 1.04	21.29* ± 1.06

Примечание: * значение достоверно отличается от эталонного контроля (вариант с лампами ДНаЗ-400) на 5%-ном уровне значимости. н.в. — нативное вещество.

Таблица 4. Элементный состав листьев и плодов растений томата (сорт Наташа) при выращивании под источниками света с различным спектральным составом в регулируемых условиях агробиополигона

Показатели	Листья				Плоды			
	Источник света				Источник света			
	ДНаЗ-400	АФИ-3000	АФИ-4000	АФИ-5000	ДНаЗ-400	АФИ-3000	АФИ-4000	АФИ-5000
Сырая зола, % а.с.в.	23.96 ± 1.19	27.20* ± 1.36	25.02 ± 1.25	25.39 ± 1.27	10.48 ± 0.52	11.63* ± 0.58	10.21 ± 0.51	11.87* ± 0.60
Азот, % а.с.в.	3.90 ± 0.19	2.86* ± 0.14	2.71* ± 0.14	3.17* ± 0.16	2.38 ± 0.12	2.01* ± 0.10	2.30 ± 0.12	2.21 ± 0.11
Фосфор, % а.с.в.	0.96 ± 0.05	0.98 ± 0.05	0.86* ± 0.04	0.94 ± 0.05	0.72 ± 0.04	0.72 ± 0.04	0.69 ± 0.03	0.66 ± 0.03
Калий, % а.с.в.	6.21 ± 0.31	5.54* ± 0.28	4.73* ± 0.24	5.92 ± 0.30	4.29 ± 0.21	4.47 ± 0.22	4.00 ± 0.20	3.88 ± 0.22
Кальций, % а.с.в.	4.54 ± 0.23	5.68* ± 0.28	5.09 ± 0.25	4.92 ± 0.25	0.35 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.35 ± 0.02	0.32 ± 0.02
Медь, mg/kg а.с.в.	5.04 ± 0.25	6.35* ± 0.32	5.41 ± 0.27	5.85* ± 0.29	0.41 ± 0.02	2.21* ± 0.11	2.10* ± 0.11	2.12* ± 0.11
Цинк, mg/kg а.с.в.	34.8 ± 1.74	39.1* ± 2.00	32.7 ± 1.63	39.6* ± 1.98	15.4 ± 0.77	16.60 ± 0.83	16.20 ± 0.81	15.00 ± 0.75
Железо, mg/kg а.с.в.	63.5 ± 3.18	66.1 ± 3.31	65.3 ± 3.26	66.4 ± 3.32	33.4 ± 1.67	39.70* ± 2.00	36.90 ± 1.84	33.20 ± 1.66
Марганец, mg/kg а.с.в.	143.6 ± 7.18	228.0* ± 11.4	185.7* ± 9.28	155.8 ± 7.79	7.90 ± 0.40	7.90 ± 0.40	7.73 ± 0.39	7.96 ± 0.40

Примечание: * значение достоверно отличается от эталонного контроля (вариант с лампами ДНаЗ-400) на 5%-ном уровне значимости. а.с.в. — абсолютно сухое вещество.

достоверное увеличение в них процентного содержания сырой золы в вариантах со светодиодными светильниками по сравнению с наблюдаемым под лампами ДНаЗ (табл. 4). При этом в листьях томата в вариантах со светодиодными светильниками отмечаются более низкие значения (тенденция или достоверные изменения) содержания азота, фосфора, калия, но более высокие (тенденция или достоверные изменения) содержания кальция, марганца, цинка, меди и железа. В плодах различия по элементному составу между вариантами

опыта менее выражены, чем в листьях, за исключением содержания меди, которое достоверно выше в вариантах под светодиодными светильниками, а также максимального содержания железа в варианте со светодиодными светильниками АФИ-3000;

— формирование под светодиодными светильниками плодов с достоверно меньшей, чем под лампами ДНаЗ-400, массой каждый, но, за счет большего их количества (тенденция) на растениях, урожай плодов в расчете на 1 м² преимущественно достоверно не

Таблица 5. Основные показатели продуктивности растений томата (сорт Наташа) при выращивании под источниками света с различным спектральным составом в регулируемых условиях агробиополигона

Источник света	Растение			Урожай плодов, kg/m ²
	Число плодов, шт.	Масса плодов, g	Масса одного плода, g	
Лампы ДНаЗ-400	13.6 ± 2.4	166.4 ± 26.5	12.8 ± 1.9	3.9 ± 0.5
АФИ-3000	12.4 ± 3.1	108.9* ± 17.0	9.0* ± 0.6	2.5* ± 0.3
АФИ-4000	18.0 ± 2.1	177.1 ± 16.1	10.0* ± 0.6	3.5 ± 0.3
АФИ-5000	17.3 ± 2.3	154.0 ± 18.1	8.9* ± 0.6	3.1 ± 0.4

Примечание: * значение достоверно отличается от эталонного контроля (вариант с лампами ДНаЗ-400) на 5%-ном уровне значимости.

Таблица 6. Качество плодов растений томата (сорт Наташа) при выращивании под источниками света с различным спектральным составом в регулируемых условиях агробиополигона

Показатели	Источник света			
	ДНаЗ-400	АФИ-3000	АФИ-4000	АФИ-5000
Влажность, %	94.41 ± 4.72	94.75 ± 4.74	94.22 ± 4.71	94.64 ± 4.73
Сухое вещество, %	5.59 ± 0.28	5.25 ± 0.26	5.78 ± 0.29	5.36 ± 0.27
Витамин С, mg/100 g н.в.	16.28 ± 0.81	18.92* ± 0.95	18.48* ± 0.92	18.92* ± 0.95
Нитраты, mg/kg н.в.	41.80 ± 1.80	33.20* ± 1.70	27.00* ± 1.30	33.20* ± 1.70
Сумма сахаров, % а.с.в.	36.33 ± 1.81	38.25 ± 1.91	38.55 ± 1.93	40.12 ± 2.00
Моносахара, % а.с.в.	35.84 ± 1.59	37.77 ± 1.89	38.03 ± 1.90	39.57* ± 1.98
Дисахара, % а.с.в.	0.49 ± 0.02	0.48 ± 0.02	0.52 ± 0.03	0.55* ± 0.03

Примечание: * значение достоверно отличается от эталонного контроля (вариант с лампами ДНаЗ-400) на 5%-ном уровне значимости. а.с.в. — абсолютно сухое вещество.

отличается от эталонного варианта (табл. 5). Только под светодиодными светильниками АФИ-3000 урожай плодов достоверно ниже на 36 % относительно такового под лампами ДНаЗ-400;

— существенное повышение, по данным анализа биохимического состава, качества и безопасности плодов томата, сформированных под светодиодными светильниками (табл. 6). Содержание витамина С в них достоверно выше, чем в плодах под лампами ДНаЗ-400, а содержание нитратов, соответственно, значимо ниже. При этом растительная продукция томатов во всех вариантах опыта полностью соответствует санитарно-гигиеническим нормативам РФ, не превышая ПДК нитратов в плодах томата — 300 mg/kg для защищенного грунта и 150 mg/kg — для открытого грунта [62].

Таким образом, созданные светодиодные светильники со спектральным составом, имитирующим солнечный спектр при расположении солнца у горизонта, в зените, после полудня, позволяют получать у такой светолюбивой культуры, как томат, сходные урожаи растительной продукции достоверно более высокого качества, чем под эталонными лампами ДНаЗ-400.

2.2. Оценка морфофизиологических реакций листового салата (*Lactuca sativa* L.) различных сортов на интенсивность светового потока в области ФАР при выращивании растений в регулируемых условиях интенсивной светокультуры

Физическое моделирование в благоприятных регулируемых условиях с облученностью на уровне 45, 75 и 105 W/m² в области ФАР под источниками света — эталонными газоразрядными натриевыми зеркальными лампами ДНаЗ-400 и разработанными в ФГБНУ АФИ светодиодными светильниками АФИ-3000 с спектральным составом, близким к таковому у ДНаЗ-400 и имитирующим солнечный спектр, когда солнце находится у горизонта — позволило выявить особенности морфофизиологических реакций сортов салата (*Lactuca sativa* L.), различающихся габитусом, формой и цветом листьев. В исследованиях использовали сорта салата из коллекции ФГБНУ ФИЦ ВИР им. Н.И. Вавилова: листовые салаты сортов Тайфун и Джаггер с зеленой окраской листьев, листовые салаты сортов Лолло Росса,

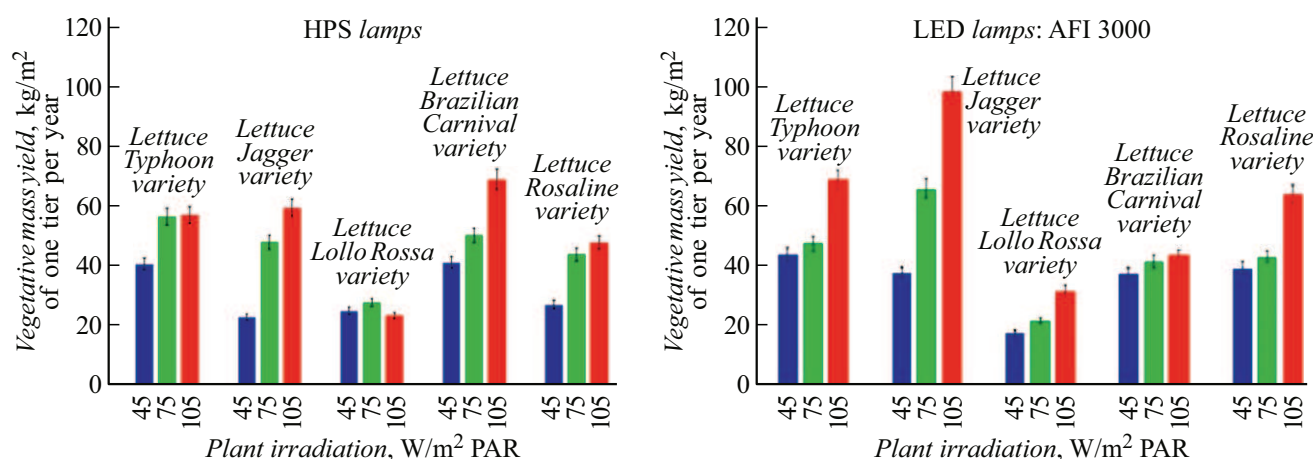


Рис. 2. Урожай вегетативной массы (kg/m^2 за год) листового салата различных сортов при разном уровне облученности растений в области ФАР под источниками света — лампами ДНаЗ-400 и светодиодными светильниками АФИ-3000 — в регулируемых благоприятных условиях интенсивной светокультуры на агробиополигоне ФГБНУ АФИ.

Бразильский карнавал с красной окраской листьев и дуболистный салат сорта Розалин красноватого цвета с антоциановой окраской листьев.

Следует отметить, что реакция растений салата на изменение интенсивности света имела в целом сходный характер под двумя типами тестируемых источников света. Так, с повышением интенсивности светового потока выявлено закономерное увеличение урожая вегетативной массы у большинства сортов салата (рис. 2), обусловленное возрастанием числа листьев и площади ассимиляционной поверхности, содержания сухого вещества (табл. 7), что косвенно свидетельствует об активизации процессов биосинтеза и работы фотосинтетического аппарата. Подтверждением этому служат преимущественно более высокие значения содержания хлорофиллов (рис. 3), а также содержания в листьях ряда сортов салатов (Тайфун, Джаггер под обоими видами источников света, Бразильский карнавал, Лолло Росса — под светодиодными светильниками, Розалин — под лампами ДНаЗ-400) магния и/или железа (на 2%–43% и 4%–48% соответственно, абсолютные значения не приведены), как известно, являющихся структурными элементами и кофакторами ферментативных процессов в растениях.

Следует отметить, что наиболее отзывчивым на увеличение интенсивности светового потока под лампами ДНаЗ-400 и под светодиодными светильниками АФИ-3000, судя по оцениваемым показателям, оказался салат сорта Джаггер.

Также весьма интересной была особенность реакции сортов с различной окраской листьев на увеличение интенсивности света, выявленная с помощью метода спектроскопии отраженной от поверхности листьев радиации (рис. 4).

Адаптивные изменения к увеличению интенсивности света у сортов салата с зеленой окраской листьев касались увеличения индекса отражения R_{800} , свиде-

тельствующего об усилении рассеяния света внутри тканей листа, в то время как у сортов салата с красной или красноватой окраской листьев наряду с рассеянием резко возрастало в них содержание каротиноидов и антоцианов (рис. 3). Следует отметить также увеличение значений индекса отражения хлорофилла в листьях салата тестируемых сортов с повышением интенсивности светового потока, что соответствует данным изменения содержания хлорофиллов, полученным с помощью химического анализа.

Интересно подчеркнуть, что с ростом облученности растений значения фотохимического индекса отражения PRI, чаще всего связанного с интенсивностью тепловой диссипации, практически не изменялись у сортов салата с зелеными листьями и несколько увеличивались у сортов салата с красными листьями, характеризующихся более высоким содержанием каротиноидов и антоцианов.

При оценке изменений показателей флуоресценции листьев салата различных сортов с возрастанием уровня их облученности установлено преимущественно увеличение (достоверное или в виде тенденции) значений эффективного квантового выхода $\Phi(II)$ и коэффициента фотохимического тушения флуоресценции на свету qP (рис. 5). При этом максимальный выход фотосинтеза F_v/F_m не изменялся.

В листьях салата большинства сортов под лампами ДНаЗ-400 отмечалась тенденция к уменьшению коэффициента зеаксантин-зависимого нефотохимического тушения NPQ при повышении интенсивности светового потока — значения были выше на 5%–50% в условиях низкоинтенсивного освещения и ниже на 1%–34% при высокой интенсивности облучения по сравнению со стандартной облученностью 75 W/m^2 . Достоверных отличий в коэффициентах NPQ для разных уровней облученности светодиодными светильниками АФИ-3000 отмечено не было. Вероятно, это связано с более эффек-

Таблица 7. Некоторые морфометрические характеристики листьев салата различных сортов и содержания в них сухого вещества при разном уровне облученности растений в области ФАР под источниками света — лампами ДНаЗ-400 и светодиодными светильниками АФИ-3000 — в регулируемых благоприятных условиях интенсивной светокультуры на агробиополигоне ФГБНУ АФИ

Показатели	Интенсивность света, W/m ² ФАР	Салат сорта Тайфун	Салат сорта Джаггер	Салат сорта Лолло Росса	Салат сорта Бразильский карнавал	Салат сорта Розалин
Источник света — лампы ДНаЗ-400						
Число листьев, шт./ растение	45	10.1* ± 0.7	20.8* ± 1.2	14.3 ± 0.7	21.2 ± 1.1	22.1* ± 1.2
	75	12.5 ± 1.0	30.9 ± 1.5	14.8 ± 0.7	22.3 ± 1.1	26.8 ± 1.2
	105	16.3* ± 1.2	34.3* ± 1.6	15.1 ± 0.8	25.9* ± 1.3	30.9* ± 1.6
Площадь листьев, см ²	45	4119.4* ± 232.3	3917.8* ± 276.4	3461.3* ± 283.9	10061.1 ± 428.7	6275.8 ± 285.0
	75	5315.4 ± 226.7	7681.9 ± 367.2	4460.4 ± 368.6	9863.8 ± 360.9	6599.2 ± 262.0
	105	4231.1* ± 236.9	8949.4* ± 434.5	3462.4* ± 340.4	9962.4 ± 358.5	7166.7 ± 341.0
Сухое вещество, %	45	4.6* ± 0.2	4.7* ± 0.2	5.2* ± 0.2	6.5 ± 0.3	3.9 ± 0.2
	75	6.2 ± 0.3	5.6 ± 0.3	5.6 ± 0.2	7.1 ± 0.4	3.7 ± 0.2
	105	6.8* ± 0.3	6.4* ± 0.2	6.1* ± 0.3	7.7 ± 0.4	4.1 ± 0.3
Источник света — светодиодные светильники АФИ-3000						
Число листьев, шт./ растение	45	10.0 ± 0.5	26.1* ± 1.9	13.3* ± 0.6	18.4* ± 0.8	25.9 ± 1.3
	75	10.8 ± 1.0	36.9 ± 3.9	15.8 ± 0.8	20.6 ± 1.0	28.2 ± 1.6
	105	14.8* ± 1.3	44.8* ± 3.1	22.9* ± 2.2	23.9* ± 2.2	30.7 ± 1.7
Площадь листьев, см ²	45	4280.6 ± 397.5	5665.5* ± 224.8	2637.4* ± 270.8	8430.7 ± 330.7	6342.0 ± 245.1
	75	3811.8 ± 334.2	8702.7 ± 363.7	3236.1 ± 308.6	7784.6 ± 260.9	6451.7 ± 279.3
	105	4478.9* ± 312.5	11635.5* ± 421.4	4113.1* ± 392.6	7730.1 ± 294.9	6683.9 ± 280.8
Сухое вещество, %	45	5.0* ± 0.2	4.3* ± 0.3	5.1* ± 0.2	6.8* ± 0.3	5.3* ± 0.2
	75	6.6 ± 0.3	5.3 ± 0.2	5.6 ± 0.3	7.7 ± 0.4	4.3 ± 0.2
	105	7.2 ± 0.4	6.1* ± 0.2	6.4* ± 0.3	7.9 ± 0.4	6.0* ± 0.4

Примечание: * значение достоверно отличается от эталонного варианта (уровень облученности 75 W/m²) на 5%-ном уровне значимости.

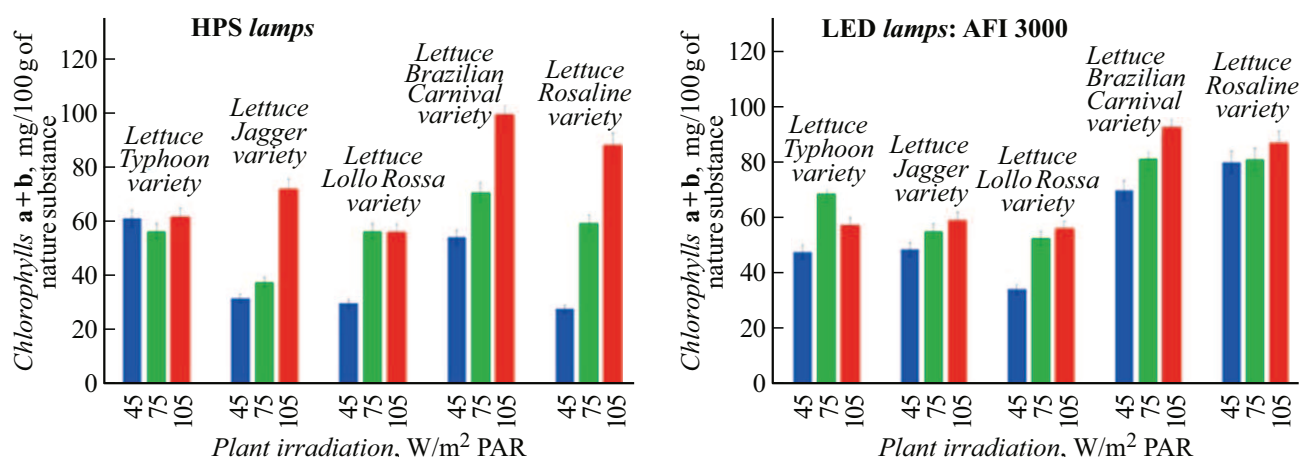


Рис. 3. Содержание хлорофиллов *a + b* (mg/100 g нативного вещества) в листьях листового салата различных сортов при разном уровне облученности растений в области ФАР под источниками света — лампами ДНаЗ-400 и светодиодными светильниками АФИ-3000 — в регулируемых благоприятных условиях интенсивной светокультуры на агробиополигоне ФГБНУ АФИ.

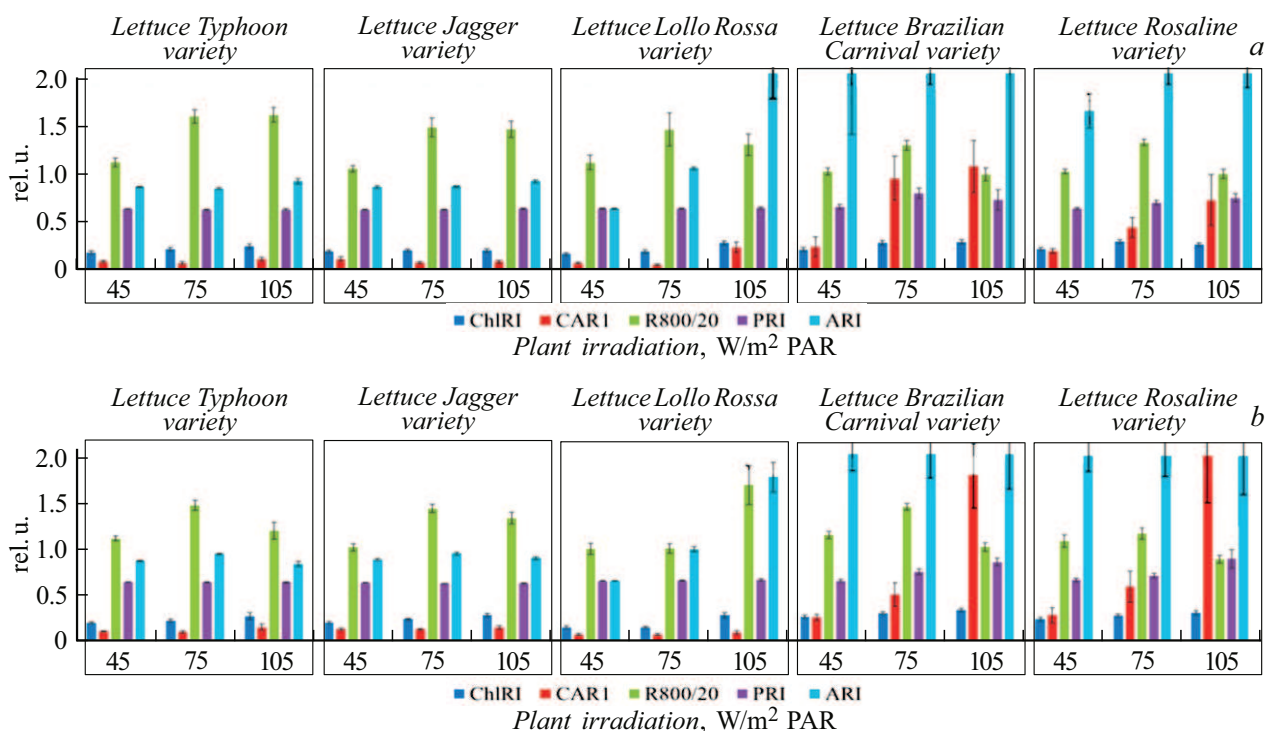


Рис. 4. Индексы отражения света листьями салата различных сортов при разном уровне облученности растений в области ФАР под источниками света — лампами ДНаЗ-400 (а) и светодиодными светильниками АФИ-3000 (б) — в регулируемых благоприятных условиях интенсивной светокультуры на агробиополигоне ФГБНУ АФИ (ChlRI — индекс отражения хлорофилла; CAR1 — индекс отражения каротиноидов; R800/20 — индекс интенсивности рассеяния света, разделенный на 20 а.е. для масштаба; PRI — индекс фотохимической активности фотосинтетического аппарата; ARI — индекс отражения антоцианов).

тивным рассеиванием энергии возбуждения в виде тепла и формированием в светособирающей антенне центров тушения, не зависящих от избыточного или недостаточного освещения, при использовании в качестве источников светодиодных светильников, формирующих более равномерное поверхностное излучение.

Значения показателя $Y(NO)$, характеризующего регулируемые потери энергии возбуждения, увеличивались с возрастанием уровня облученности под лампами ДНаЗ-400 и практически не изменялись под светодиодными светильниками АФИ-3000, что может быть связано с разницей в доле инфракрасной составляющей спектра этих источников света.

Судя по изменению содержания нитратов и витамина С (табл. 8) в листьях исследуемых сортов салата, с увеличением интенсивности светового потока происходит достоверно выраженное или в виде тенденции снижение содержания нитратов и преимущественное увеличение содержания витамина С. Только у сорта Тайфун отмечали максимальные значения содержания витамина С при облученности 75 W/m² ФАР под обоими видами светильников. Значения оцениваемых показателей и зависимости от уровня облученности сходны под натриевыми газоразрядными лампами и под светодиодными светильниками АФИ-3000, что, скорее всего,

обусловлено сходством спектрального состава света указанных его источников.

По содержанию нитратов растительная продукция салата тестируемых сортов соответствует санитарно-гигиеническим нормативам Российской Федерации (МУ N 5048-89) в вариантах облученности 75 и 105 W/m² ФАР. При облученности 45 W/m² ФАР активность фотосинтетического аппарата, вероятно, была более низкой, и количество светового потока было недостаточным для ассимиляции нитратного азота в реакциях метаболизма. В результате количество нитратов в листьях салата сортов Тайфун, Лолло Росса, Бразильский карнавал несколько превышало значение допустимого уровня содержания нитратов в продуктах растительного происхождения — 3000 mg/kg для листовых и листостебельных овощных культур [62].

Полученные результаты подтверждают перспективность продолжения подобных исследований в регулируемых условиях среды обитания для выявления чувствительных форм культурных растений и повышения урожайности растительной продукции за счет установленных значений оптимизации параметров световой среды, а также форм растений с низкой чувствительностью к изменениям интенсивности светового потока в области ФАР и снижения энергозатрат на производство растительной продукции при их культивировании в условиях

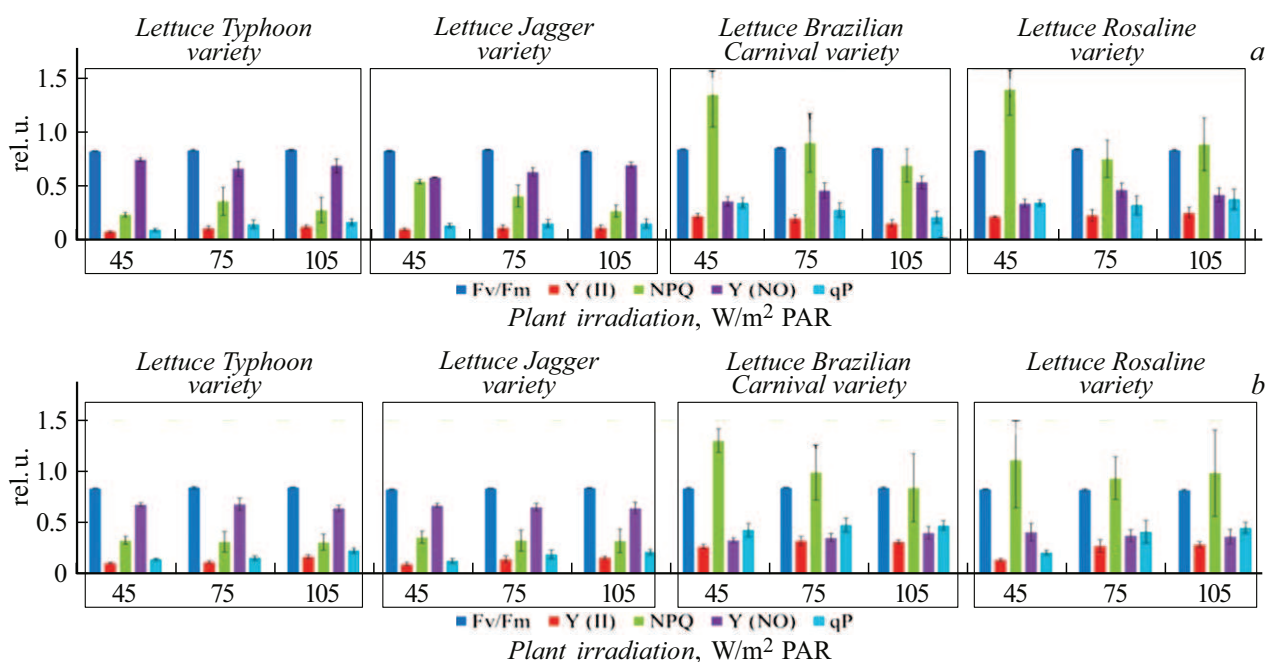


Рис. 5. Показатели флуоресценции листьев салата различных сортов при разном уровне облученности растений в области ФАР под источниками света — лампами ДНаЗ-400 (a) и светодиодными светильниками АФИ-3000 (b) — в регулируемых благоприятных условиях интенсивной светокультуры на агробиополигоне ФГБНУ АФИ (Fv/Fm — максимальный фотохимический выход ФС II; Y(II) — эффективный фотохимический выход ФС II; NPQ — коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции, рассчитываемый согласно уравнению Штерна–Фольмера; Y(NO) — нерегулируемые потери энергии возбуждения; qP — коэффициент фотохимического тушения флуоресценции на свету).

Таблица 8. Некоторые характеристики качества и безопасности растительной продукции салата различных сортов при разном уровне облученности растений в области ФАР под источниками света — лампами ДНаЗ-400 и светодиодными светильниками АФИ-3000 — в регулируемых благоприятных условиях интенсивной светокультуры на агробиополигоне ФГБНУ АФИ

Показатели	Интенсивность света, W/m ² ФАР	Салат сорта Тайфун	Салат сорта Джаггер	Салат сорта Лолло Росса	Салат сорта Бразильский карнавал	Салат сорта Розалин
Источник света — лампы ДНаЗ						
Содержание нитратов mg/kg	45	3188.0* ± 459.4	2424.6* ± 171.2	3457.0* ± 322.8	2830.0* ± 191.5	2336.0* ± 166.8
	75	1411.0 ± 270.5	1555.0 ± 127.7	2357.0 ± 217.8	1743.0 ± 187.1	1973.0 ± 148.6
	105	933.0* ± 96.6	1035.6* ± 91.7	1404.0* ± 95.2	912.0* ± 55.6	1106.0* ± 105.3A
Содержание витамина С, mg/100 g н.в.	45	11.7* ± 0.6	17.4* ± 0.8	11.8 ± 0.6	23.8* ± 1.2	20.2 ± 1.0
	75	18.3 ± 0.9	19.2 ± 0.8	11.9 ± 0.6	26.8 ± 1.3	22.0 ± 1.1
	105	16.3* ± 0.8	22.1* ± 0.9	17.6* ± 0.9	31.2* ± 1.6	22.9 ± 1.1
Источник света — светодиодные светильники АФИ-3000						
Содержание нитратов mg/kg	45	2003.0* ± 200.1	2656.2* ± 232.8	3370.0* ± 348.5	3398.0* ± 219.9	2373.0* ± 148.6
	75	1049.0 ± 152.4	1795.6* ± 189.7	2357.0 ± 317.85	2305.0 ± 215.2	1792.0 ± 89.6
	105	743.0* ± 87.1	801.8* ± 90.1	1398.0* ± 219.9	1200.0* ± 210.0	973.0* ± 140.6
Содержание витамина С, mg/100 g н.в.	45	14.3* ± 0.7	19.2* ± 0.9	6.6* ± 0.6	29.0* ± 1.5	17.6* ± 0.9
	75	17.4 ± 0.9	23.4 ± 0.9	10.8 ± 0.5	33.4 ± 1.7	20.2 ± 1.0
	105	14.7* ± 0.7	27.6* ± 1.8	15.2* ± 0.8	38.3* ± 1.9	20.7 ± 1.0

Примечание: * значение достоверно отличается от эталонного варианта (уровень облученности 75 W/m²) на 5%-ном уровне значимости. н.в. — нативное вещество.

Таблица 9. Сроки прохождения фаз онтогенеза (в сутках от посева) у сортов сои при выращивании в условиях интенсивной светокультуры при 14- и 18-часовом фотопериоде

Сортообразец	Фотопериод, h	Начало цветения, day	Начало созревания бобов, day	Уборка растений, day
Баргузин	14	33 ± 2	65 ± 4	78 ± 3
	18	33 ± 3	73 ± 4	88* ± 4
Вилана	14	33 ± 2	72 ± 4	83 ± 3
	18	52* ± 4	170* ± 4	186* ± 4
Гном	14	33 ± 2	67 ± 3	78 ± 3
	18	52* ± 4	119* ± 4	132* ± 4
Ирбис	14	29 ± 2	67 ± 3	78 ± 3
	18	33 ± 3	131* ± 4	145* ± 4
Олимпия	14	29 ± 2	65 ± 3	78 ± 3
	18	39* ± 4	90* ± 4	102* ± 3
Славия	14	29 ± 2	72 ± 3	83 ± 3
	18	39* ± 3	133* ± 4	148* ± 3

Примечание: * значение при 18-часовом фотопериоде достоверно отличается от 14-часового на 5%-ном уровне значимости.

меньшей интенсивности светового потока в области ФАР.

2.3. Оценка влияния фотопериода на морфофизиологические характеристики растений, формирование их продуктивности на примере сортообразцов сои культурной (*Glycine max* (L.) Merrill)

Ранее нами на примере сортообразцов руколы (*Eruca sativa* Mill), в том числе весьма ценных по биохимическому составу, установлены особенности изменения морфофизиологических характеристик и показателей продуктивности растений при различном фотопериоде в регулируемых условиях светокультуры (световой период 12, 14 и 16 h) под лампами ДНаЗ с облученностью $(75 \pm 5) \text{ W/m}^2$, а также в тепличных (световой период в среднем за период вегетации — 16.8 h) и полевых условиях (световой период в среднем за период вегетации — 17.9 h); выявлены корреляции морфометрических показателей растений с различными оптическими индексами и параметрами флуоресценции хлорофилла в указанных выше условиях различного фотопериода. Обоснована перспективность использования оптических показателей листьев 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 [63,65].

Результаты оценки фотопериодической чувствительности образцов сои при выращивании на разных фотопериодах показали, что в условиях 14-часового фотопериода не было существенных отличий между изучаемыми сортами по срокам прохождения фаз онтогенеза, тогда как на 18-часовом фотопериоде они четко проявились (табл. 9). В частности, начало цветения у всех изучаемых сортов при более коротком фотопериоде варьировалось в пределах 29–33 суток от посева, начало созревания бобов — 65–72 суток, уборку растений проводили на 78–83 сутки, т.е. отличия между сортами при уборке составили всего 5 суток. Следует отметить, что полное созревание сои в условиях интенсивной светокультуры ускорялось по сравнению с полевыми условиями (табл. 9) в среднем на 20–25 суток. В то же время увеличение длины светового дня до 18 h по-разному сказалось на продолжительности вегетации у изучаемых сортов, в целом длительность всех фаз онтогенеза существенно возросла, за исключением очень раннего сорта Баргузин, который, как отмечалось выше, генетически малочувствителен к длине дня [51] (табл. 9). Среди остальных сортов меньшей степенью фотопериодической чувствительности характеризовался сорт Олимпия, длительность вегетационного периода которого при длинном 18-часовом дне, несмотря на существенно увеличение длительности всех фаз онтогенеза, не превышала таковую в условиях Краснодарского края (табл. 9). Раннеспелые сорта Гном, Ирбис, Славия при 18-часовом фотопериоде характеризовались существенно более длительным периодом цветения (около 30, 50 суток и более), чем при 14-часовом световом периоде. В результате их созревание в условиях 18-часового

фотопериода наступило на 54–67 суток позднее, чем при 14-часовом фотопериоде, и длительность вегетационного периода существенно возросла по сравнению с таковой в условиях Краснодара (табл. 9).

Среднеспелый сорт Вилана характеризовался наиболее высокой степенью фотопериодической чувствительности. Длительность цветения у него составила около 80 суток, а общая продолжительность вегетации при 18 h возросла в 2.2 раза по сравнению с 14-часовым фотопериодом (табл. 9).

Увеличение длительности периода вегетации у всех изученных сортов сои при 18-часовом фотопериоде сопровождалось существенным изменением морфобиологических характеристик растений. Прежде всего, существенно увеличилась высота растений — на 142.8%–268.0% по сравнению с 14-часовым фотопериодом (табл. 10). При этом наименьшая прибавка высоты — 142.8% от значений при 14-часовом световом дне — была выявлена у фотопериодически малочувствительного сорта Баргузин, далее — 187.0% — у сорта Олимпия; у остальных сортов прибавка высоты главного стебля составила более 200%. Следующий показатель — число узлов — составил 135.6%–209.0% от такового на 14 h. В наибольшей степени из всех изученных показателей возросло число боковых побегов, которое в условиях 14-часового фотопериода составляло в среднем от 0.05 штук на растение (сорт Баргузин) до 1.15 штук (сорт Вилана), а при 18-часовом фотопериоде — от 2.1 (с. Баргузин) до 7.4 (сорт Вилана), т.е. прибавка на 18 h составила 543%–5300% (табл. 10). Несмотря на столь существенное увеличение высоты растений и числа боковых побегов, число бобов и зерен в пересчете на одно растение увеличилось только на 20.8%–137.9% и 48.4%–150.4% соответственно, т.е. увеличение вегетативной массы растений не сопровождалось пропорциональным увеличением урожая зерна. Так, масса зерна на растение при 18-часовом фотопериоде составила 128.8%–245.5% от показателей 14-часового фотопериода, при этом наименьшие отличия были выявлены у сорта Баргузин (28.8%), а наибольшие — у сортов Олимпия, Ирбис и Гном — 58.3%–145.5%. Следует отметить, что в условиях 18-часового фотопериода масса 1000 зерен у всех сортов несколько снижалась (достоверно для сортов Баргузин и Ирбис, для остальных — в виде тенденции). Наряду с этим, при более продолжительном освещении увеличилось среднее число зерен в бобе — на 3.5%–44.5%, достоверно для сортов Ирбис и Олимпия, у остальных — в виде тенденции. При этом у сорта Олимпия с максимальной прибавкой числа зерен на боб (44.5%) достоверно увеличилась средняя масса одного боба — на 49.5%.

Увеличение светового дня сопровождалось общим увеличением механической прочности растений. Так, при 14-часовом фотопериоде в условиях светокультуры сорта Баргузин и Олимпия были неустойчивы к растрескиванию стручков и имели тонкие ломкие побеги; чуть более прочными, но малоустойчивыми к растрескиванию

были растения сои сорта Ирбис, среднеустойчивы — сорта Вилана и Славия, и наиболее прочным и устойчивым к растрескиванию стручков оказался карликовый сорт Гном — генетический носитель данного признака.

В свою очередь, при вегетации в условиях 18 h не было выявлено растрескивания стручков ни у одного из изучаемых сортов, и наблюдалось снижение индекса аттракции на 2.2%–28.3% (достоверное для сортов Баргузин, Ирбис и Олимпия), т.е. происходило перераспределение продуктов ассимиляции между компонентами формирующегося боба в сторону увеличения массы створок (табл. 10).

Следует отметить, что наименьшая зерновая продуктивность в условиях обоих фотопериодов наблюдалась у наиболее скороспелых сортов Баргузин и Олимпия, а наибольшая при 14-часовом фотопериоде — у сортов Вилана, Ирбис и Славия, а при 18-часовом — у сорта Гном, который сформировал большое число боковых побегов и наибольшее число бобов на растение среди всех изучаемых сортов, а также у сорта Ирбис. Интересным является тот факт, что карликовый сорт Гном на 18 h характеризовался индетерминантным ростом, средняя высота растений в этих условиях превышала 180 см. При этом сорт Вилана характеризовался самым низким показателем массы 1000 зерен при обоих фотопериодах, а наиболее крупное зерно сформировали растения сортов Гном, Ирбис и Славия.

2.4. Обсуждение экспериментальных данных

Проведенные исследования особенностей формирования световой среды, а именно ее спектрального состава, энергетической облученности и фотопериода позволили на примере овощных культур (в настоящей работе — томат, листовой салат, в проведенных ранее — кочанный салат, рукола, редис) и растений сои выявить сходства и различия в морфобиологических реакциях на нее растений, специфику видовой, сортовой адаптации растений и эффективность световой регуляции физиологического состояния, роста, развития выращиваемой культуры, количества и качества формируемого урожая растительной продукции. Так, изучение влияния особенностей спектрального состава источников света, имитирующих солнечный спектр в разные периоды суточного цикла с различным соотношением интенсивностей излучения в красной (600–700 nm), зеленой (500–600 nm) и синей (400–500 nm) областях спектра, подтвердили высказанную гипотезу о положительной реакции на него у растений. Наибольший отклик и более выраженный положительный эффект на их состояние и показатели оказывал спектральный состав светодиодного светильника АФИ-5000, имитирующего спектр солнца в полдень с большей долей синего света. Так, ранее нами показано, что салат Ромэн в данном варианте демонстрировал лучшую динамику нарастания площади листовой ассимилирующей поверхности, содержания сухого вещества в листьях и, как следствие, увеличение урожайности

Таблица 10. Морфофизиологические показатели сортов сои при выращивании в условиях интенсивной светокультуры при 14- и 18-часовом фотопериоде

Образец	Фото-период, h	Высота главного побега, см	Число узлов, шт.	Число боковых побегов, шт.	Число бобов на растение, шт.	Число зерен на растение, шт.	Число зерен на боб, шт.	Масса зерен на растение, g	Масса 1000 зерен, g	Масса одного боба, g	Масса семян/масса створок (Ia)
Баргузин	14	115.9±7.6	9.0±0.4	0.05±0.01	13.9±1.9	27.7±3.6	2.0±0.2	3.8±0.6	137.0±4.6	0.4±0.03	2.1±0.1
	18	165.5*±10.3	12.2*±0.4	2.1*±0.5	21.9*±3.4	45.2*±6.6	2.1±0.1	4.9±0.7	109.2*±5.0	0.4±0.02	1.5*±0.1
Вилана	14	152.0±10.9	9.6±0.6	1.2±0.04	21.4±3.8	35.2±5.2	1.7±0.1	4.4±0.7	126.2±6.7	0.3±0.02	1.7±0.1
	18	313.2*±21.7	17.7*±0.7	7.4*±0.4	30.7*±5.5	56.2*±8.4	1.9±0.1	6.6*±1.0	116.8±6.2	0.4±0.02	1.7±0.1
Гном	14	68.4±3.9	7.8±0.6	0.6±0.2	14.5±1.8	25.9±3.4	1.8±0.1	3.9±0.7	147.1±9.0	0.4±0.04	1.7±0.2
	18	183.2*±13.7	16.2*±0.5	7.2*±0.6	34.5*±2.6	64.9*±4.6	1.9±0.1	9.3*±0.9	143.7±10.8	0.5±0.04	1.6±0.1
Ирбис	14	134.0±9.4	11.6±0.5	0.1±0.01	17.5±1.6	27.5±3.2	1.6±0.1	4.5±0.6	162.2±7.7	0.4±0.04	1.9±0.1
	18	356.3*±23.6	20.3*±1.4	5.4*±1.2	31.8*±2.5	55.8*±4.3	1.8*±0.03	7.9*±0.6	141.8*±2.1	0.4±0.01	1.5*±0.02
Олимпия	14	121.8±7.3	9.0±0.4	0.9±0.05	17.0±2.3	18.8±2.8	1.1±0.1	2.4±0.3	130.7±12.4	0.2±0.02	1.4±0.1
	18	227.7*±16.5	13.7*±0.6	4.2*±0.5	20.6±2.3	33.1*±4.3	1.6*±0.1	3.8*±0.6	115.4±4.2	0.3*±0.04	1.2±0.1
Славия	14	119.4±9.1	9.6±0.8	1.4±0.1	20.1±2.9	31.3±5.4	1.6±0.1	4.7±0.7	156.8±13.0	0.4±0.02	1.8±0.1
	18	302.4*±28.1	19.5*±1.1	6.3*±0.5	27.8*±3.6	46.5*±5.5	1.7±0.1	6.5*±0.9	138.8±5.3	0.4±0.02	1.6±0.3

Примечание: * значение при 18-часовом фотопериоде достоверно отличается от 14-часового на 5%-ном уровне значимости.

вегетативной массы [64]. У редиса двух сортов, различающихся по приспособленности к условиям интенсивной светокультуры, отмечалось сходное значение показателей роста и продуктивности при выращивании растений под светильниками АФИ-5000 и эталонными газоразрядными натриевыми лампами [38]. У растений томата под светодиодными светильниками АФИ-5000 и АФИ-4000, имитирующими спектр солнца в зените и после полудня, за счет увеличения числа плодов и стеблей, активизации метаболизма и поступления ряда макро- и микроэлементов в листья растений, в конечном итоге формировался сходный по значениям урожай плодов с таковым у растений под эталонными газоразрядными натриевыми лампами, но имеющий существенно более высокие значения показателей качества и безопасности продукции, судя по содержанию витамина С, содержанию нитратов, сухому веществу. Отмеченные изменения в физиологическом состоянии

растений под светильниками АФИ-5000 способствовали снижению содержания нитратов в листьях, плодах и, тем самым, повышению безопасности и улучшению качества продукции. В целом, результаты исследования согласуются с литературными данными, свидетельствующими о преимуществе искусственного солнцеподобного спектра освещения в положительном влиянии на сырую массу растений салата по сравнению с использованием белого и красно-синего света, излучаемых светодиодными светильниками [23].

Мы полагаем, что высокая продуктивность и урожай томата в эталонном контроле (лампы ДНаЗ), где по сравнению со светодиодными источниками меньше радиации красного и синего диапазонов, максимально поглощаемой хлорофиллом, по-видимому, может отчасти объясняться высокой долей оранжевой радиации в спектре ламп. Подтверждением этому могут служить результаты исследований [66–69], свидетельствующие о

стимулирующем влиянии оранжевого (янтарного) света на рост и накопление биомассы салата и томата.

Как известно, синий и красный свет играют ключевую роль в процессах фотосинтеза, при этом спектр их действия на растения неодинаков. Красный свет характеризуется самой высокой относительной квантовой эффективностью фотосинтеза; он регулирует фотосинтетические процессы и вызывает общее увеличение биомассы, рост объема корневой системы, удлинение стеблей, рост площади листовой поверхности, стимулирует переход к генеративной стадии развития, регулирует продолжительность цветения. Синий свет, в свою очередь, также регулирует рост растений, контролирует открытие устьиц и транспирацию, релокацию хлоропластов, вызывает увеличение размеров листьев у некоторых культур, повышает содержание пигментов, стимулирует синтез ряда вторичных метаболитов [70]. В работе [71] показано, что красный свет увеличивал биомассу листьев и содержание сухого вещества у *Alternanthera brasiliana* Kuntze, в то время как синий свет влиял на морфогенез листьев, способствуя дифференцировке клеток мезофилла и образованию межклеточных пространств, и повышал толщину и площадь листа. Во многих публикациях показано стимулирующее влияние красного света на размер и надземную биомассу различных культур, в частности, салата [9,70,71], листовой капусты пак-чой [72], дварф-томата [73].

В то же время присутствие синего света необходимо для нормального роста растений, и добавление синих длин волн в определенных (оптимальных для данной культуры или сорта) пропорциях повышает урожай и улучшает качественные показатели у ряда культур в контролируемых условиях [74–77]. При этом, как показано, требования к оптимальному составу световой среды для разных культур, а также их реакция на качество света, могут существенно различаться. В частности, в публикации [78] выявлена разная степень чувствительности таких культур, как томат, огурец, перец, соя, салат, редис и рожь, к интенсивности освещения и содержанию синего света в спектре осветительного оборудования, что определило различия в их физиологической реакции на применяемые световые воздействия. Кроме того, сообщается также о существовании сортовой специфики в реакциях на качество света среди образцов одной культуры (результат взаимодействия „генотип–среда“) [79–81]. Это заключение подтвердили и наши исследования.

Синий свет в определенных количествах способен не только повышать, но и снижать ростовые показатели ряда растений. Показано, что высокие пропорции синего света могут снижать биомассу надземной части салата [82–85], высоту и биомассу побегов огурца [82,85], сухую массу побегов огурца, перца и томата [78]. Наряду с этим отмечается, что синий свет может стимулировать развитие корневой системы и повышать биомассу корней у разных культур [74,85–87]. Проведенные нами

ранее эксперименты также показали некоторое торможение роста надземной части и одновременно стимуляцию роста запасяющего корня — корнеплода — у обоих сортов редиса, а также корней томата в варианте АФИ-5000 с максимальной долей синего света в спектре [38].

Наблюдаемые изменения оптических характеристик листьев редиса (уменьшение содержания хлорофилла — ChlRI и рассеяния света внутри листа — R_{800} , а также накопления антоцианов — ARI-1 и усиление тепловой диссипации — PRI) [38] и содержания хлорофилла в листьях томата под светодиодными светильниками по сравнению с лампами ДНаЗ, по-видимому, является проявлением „down regulation“ фотосинтетических процессов. Снижение активности фотосинтеза при высокой интенсивности радиации синего диапазона в спектре ФАР (фотоингибирование), предотвращает фотоповреждение фотосистемы II и, вероятно, отвечает за адаптацию к условиям интенсивного искусственного освещения с высокой долей синей радиации в спектре ФАР.

Созданные нами светодиодные светильники, имитирующие солнечный свет, могут быть рассмотрены как перспективный энергоэффективный ресурсосберегающий источник света для управляемого экологичного сельского хозяйства.

Оптимизация энергетической облученности весьма важна для поиска и нахождения компромиссных ее значений, обеспечивающих реализацию продукционного потенциала выращиваемой культуры при снижении затрат на единицу производимой растительной продукции. Оценка морфофизиологических реакций растений салата различных сортов, различающихся, в частности, цветом и формой листьев, выявила в целом сходство в направленности изменений показателей состояния растений в зависимости от интенсивности радиации, поступающей от двух тестируемых источников света (ДНаЗ-400 и АФИ-3000). Судя по спектральным характеристикам листьев и изменению показателей флуоресценции хлорофилла в листьях, происходит активизация работы фотосинтетического аппарата, причем, вследствие более равномерного распределения светового потока от светодиодных источников света и меньшей доли инфракрасной составляющей в их спектре, у растений в вариантах с АФИ-3000 осуществляется, по-видимому, более быстрая адаптация к уровням облученности и, вероятно, несколько более эффективное усвоение лучистой энергии при одновременном снижении непроизводительных потерь.

Представляют интерес для дальнейших исследований выявленные с помощью метода спектроскопии отраженной от поверхности листьев радиации различия в адаптации салатов с разной окраской листьев к интенсивности светового потока, а именно увеличение R_{800} , свидетельствующее об усилении рассеяния внутри листа, связанное с особенностями его внутренней структуры, у сортов салата с зеленой окраской листьев, и, наряду с ростом R_{800} , резкое увеличение содержания каротиноидов и антоцианов — у сортов салата с красной или красноватой окраской листьев. Следует отметить

четкое проявление взаимосвязанных процессов с увеличением интенсивности светового потока — возрастание числа листьев и площади ассимиляционной поверхности, активизации процессов биосинтеза и работы фотосинтетического аппарата, содержания сухого вещества, и, как следствие, увеличение урожая вегетативной массы у большинства сортов салата.

Фотопериодическая чувствительность — важнейший селекционный признак, проявление которого наиболее выражено на контрастных фотопериодах в полностью регулируемых условиях среды обитания растений. Проведенные на агробиополигоне ФГБНУ АФИ исследования показали высокую генетическую вариабельность исследуемых сортов сои культурной (*Glycine max* (L.) Merrill) селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК по реакции на длину светового дня. Выявлены наиболее скороспелые и малочувствительные к фотопериоду в светокультуре сорта — Баргузин и Олимпия, среднечувствительные сорта — Гном, Ирбис и Славия, и высокочувствительный сорт — Вилана. Показано, что увеличение фотопериода от 14 до 18 h привело к значительному увеличению высоты растений и числа боковых побегов у всех исследуемых сортов — в 1.4–2.7 раза и 4.7–42 раза соответственно. При этом масса зерна с растения увеличилась только в 1.3–2.4 раза, что свидетельствует о том, что длинный 18-часовой фотопериод в значительной степени благоприятен для роста вегетативной массы растений сои исследуемых сортов, но не для получения высоких урожаев зерна. Кроме того, в условиях 18-часового фотопериода масса 1000 зерен у всех исследуемых сортов несколько снижалась. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что сорта сои, селекция которых проводилась в световых условиях Краснодарского края при средней длине дня во время вегетационного периода, приближенной к 14 h, в условиях светокультуры также целесообразно выращивать на более коротком фотопериоде — 14 h, с целью экономии пространственно-временных ресурсов и получения большего количества поколений/вегетаций (до 4) в год. При этом 18-часовой фотопериод может служить „контрастирующим фоном“ для оценки степени фотопериодической чувствительности образцов сои при селекции новых сортов для различных регионов России.

Подбор оптимальных условий выращивания и выявление потенциально высокопродуктивных образцов является трудоемкой задачей, особенно актуальной в условиях искусственного освещения. Использование современных оптических методов (спектроскопия, флуоресцентный анализ) способно снизить временные и ресурсные затраты и обеспечить неинвазивный, т.е. не требующий разрушения объекта исследований, мониторинг состояния растений. Как было показано ранее [65,88] на примере 16 образцов руколы (*Eruca sativa* Mill.) из коллекции ВИР, при сравнительной оценке морфофизиологических реакций сортообразцов на фотопериод 12, 14 и 16 h в строго контролируемых, тепличных и полевых условиях выявлены тесные корреляционные связи (коэффициент корреляции — от 0.90 до 0.99

при $p = 0.05$) между морфологическими признаками, характеризующими продуктивность (диаметр розетки, высота одного растения, количество листьев, масса одного растения), и некоторыми оптическими показателями (R_{800} , PRI_{mod} , ARI_{mod} , $PSRI$, Y (II), Fv/Fm). Это подтверждает перспективность использования оптических показателей листьев 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.

Заключение

Исследование в регулируемых благоприятных условиях особенностей реакции на уровне генотип–среда у различных сельскохозяйственных культур на формируемую световую среду, включая спектральный состав, интенсивность света, фотопериод, позволило получить следующие основные результаты, обеспечивающие в настоящее время или в ближайшей перспективе оптимизацию продукционного процесса выращиваемых сельскохозяйственных культур, улучшение качества их растительной продукции при снижении затрат на ее производство, а также дало теоретический и практический материал для эффективного отбора и/или создания адаптированных к условиям выращивания скороспелых и высокоурожайных форм с улучшенными хозяйственно-ценными признаками (томат, салат, рукола, редис, соя).

На основе анализа изменений морфофизиологических характеристик и показателей продуктивности у растений томата в работе и в проведенных нами ранее подобных исследованиях с растениями кочанного салата и редиса, а также качества растительной продукции показано, что широкополосные светодиоды, имитирующие солнечный свет с учетом суточных особенностей распространения солнечных лучей, перспективны для получения продукции салата, редиса и томата в условиях светокультуры. Выявлено, что наиболее равномерное из исследованных распределение интенсивности излучения по основным диапазонам ФАР в области синего (400–500 nm), зеленого (500–600 nm), красного (600–700 nm) света в соотношении 25%:38%:37% в спектре светодиодного светильника АФИ-5000 способствует увеличению урожая корнеплодов редиса, кочанного салата, числа плодов томата. Это может быть связано с установленными ранее на примере редиса и кочанного салата явлением снижения количества отраженной, а, следовательно, потерянной фотосинтетически наиболее высокоэффективной радиации синего и красного диапазонов при вегетации растений в световой среде с цветовой температурой 5000 K.

Впервые в регулируемых условиях интенсивной светокультуры проведена сравнительная оценка влияния

энергетической облученности промышленных газоразрядных натриевых ламп и оригинальных светодиодных источников света, по спектральному составу имитирующих спектр солнца при нахождении его у горизонта, на рост, развитие, продуктивность различных сортов салата с зелеными или красными листьями, качество растительной продукции. Оценены и выявлены наиболее эффективные уровни облученности для каждого тестируемого сортообразца салата. Оптическими методами установлено, что адаптивные изменения с увеличением интенсивности света у сортов салата с зеленой окраской листьев касались увеличения индекса отражения R_{800} , свидетельствующего об усилении рассеяния света внутри листа, в то время как у сортов салата с красной или красноватой окраской листьев наряду с ростом R_{800} резко возрастало содержание в них каротиноидов и антоцианов. Судя по спектральным характеристикам и изменению показателей флуоресценции хлорофилла, в листьях растений с увеличением уровня их облученности под указанными источниками света происходит активизация работы фотосинтетического аппарата, причем, вследствие более равномерного распределения светового потока от светодиодных источников света и меньшей доли инфракрасной составляющей в их спектре, в вариантах с АФИ-3000 осуществляется, по-видимому, более быстрая адаптация салата к интенсивности световой среды и, вероятно, несколько более эффективное усвоение лучистой энергии при одновременном снижении непроизводительных потерь.

Впервые в условиях интенсивной светокультуры оценена сортовая реакция (взаимодействие „генотип–среда“) на длительность фотопериода у образцов сои культурной разных групп спелости. Были идентифицированы образцы, различающиеся по степени фотопериодической чувствительности: малочувствительные, средне- и сильночувствительные. Выявлено ускорение развития растений сои при 14-часовом фотопериоде по сравнению с таковым в условиях поля в регионе селекции (Краснодарский край), что позволяет рекомендовать данный фотопериод для ускоренного размножения ценных генотипов в условиях интенсивной светокультуры с возможностью получения до 4 вегетаций культуры в течение одного календарного года. Показано, что 18-часовой фотопериод может служить „контрастирующим фоном“ для оценки степени фотопериодической чувствительности образцов сои при селекции новых сортов для различных регионов России.

Ранее установленные нами корреляции морфометрических показателей образцов руколы с различными оптическими индексами при различных фотопериодах в строго контролируемых условиях интенсивной светокультуры, а также в тепличных и полевых условиях, служат обоснованием перспективности использования оптических показателей листьев 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.

Результаты оценки реакции различных сортов салата на энергетическую облученность в области ФАР подтверждают перспективность продолжения подобных исследований и с другими сельскохозяйственными культурами в регулируемых условиях среды обитания для выявления их чувствительных форм и повышения урожайности растительной продукции за счет установленных значений оптимизации параметров световой среды, а также форм растений с низкой чувствительностью к изменениям облученности в области ФАР и снижения энергозатрат на производство растительной продукции при их культивировании в условиях меньшей интенсивности светового потока в области ФАР. В дальнейшем планируется продолжить изучение механизмов адаптации различных сельскохозяйственных культур к моделируемым условиям световой, корнеобитаемой и воздушной среды для разработки усовершенствованной методологии многомерной оптимизации среды обитания растений и эффективного управления количеством и качеством урожая получаемой растительной продукции, скрининга генетически разнообразных генотипов и популяций сельскохозяйственных растений и генетико-селекционного улучшения хозяйственно-ценных признаков растений для получения новых высокопродуктивных форм (линий, сортов), адаптированных к условиям интенсивной светокультуры, отзывчивых к применению био-, нано-, агротехнологий нового поколения, обеспечивающих расширение возможностей умного сельского хозяйства в части производительности, качества, мобильности, разнообразия ассортимента производимых культур.

Благодарности

Выражаем глубокую благодарность руководству ФГБНУ ФИЦ ВИР и его ведущему научному сотруднику, и.о. зав. отделом генетических ресурсов овощных и бахчевых культур А.М. Артемьевой за предоставление семян листовых и листостебельных овощных культур, руководству ФГБНУ ФНЦ овощеводства и его главному научному сотруднику лаборатории новых технологий И.Т. Балашовой за предоставление семян томата селекции данного института; руководству ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК им. В.С. Пустовойта и его зав. отделом сои С.В. Зеленцову за предоставление семян сортообразцов сои селекции данного института.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального бюджетного государственного научного учреждения „Агрофизический научно-исследовательский институт“ из средств Программы фундаментальных науч-

ных исследований государственных академий наук на 2025-2027 годы, этап № FGEG-2025-0007.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G. Niu, J. Masabni. *Horticulturae*, **4**, 28 (2018). DOI: 10.3390/horticulturae4040028
- [2] P. Lejeune, A. Fratamico, F. Bouché, S. Huerge-Fernández, P. Tocquin, C. Périlleux. *GigaScience*, **11**, giab101 (2022). DOI: 10.1093/gigascience/giab101
- [3] K. Baghalian, M.-R. Hajirezaei, T. Lawson. *Front. Plant Sci.*, **14**, 1334641 (2023). DOI: 10.3389/fpls.2023.1334641
- [4] K. Bhattarai, A.B. Ogden, S. Pandey, G.V. Sandoya, A. Shi, A.N. Nankar, M. Jayakodi, H. Huo, T. Jiang, P. Tripodi, C. Dardick. *Front. Plant Sci.*, **15**, 1524601 (2025). DOI: 10.3389/fpls.2024.1524601
- [5] Е.И. Ермаков, И.Н. Черноусов. *Матер. Всерос. конф. „Управление продукционным процессом растений в регулируемых условиях“* (АФИ, СПб., 1996), с. 14.
- [6] Е.И. Ермаков. *Избранные труды* (ПИЯФ РАН, СПб., 2009)
- [7] Y.Z. Shen. *Life Sci. Space Res.*, **2**, 38 (2014). DOI: 10.1016/j.lssr.2014.06.001
- [8] Г.Г. Панова, О.Р. Удалова, Е.В. Канаш, А.С. Галушко, А.А. Кочетов, Н.С. Прияткин, М.В. Архипов, И.Н. Черноусов. *ЖТФ*, **90** (10), 1633 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19
- [9] R. Paradiso, S. Proietti. *J. Plant Growth Regulation*, **41** (2), 742 (2022). DOI: 10.1007/s00344-021-10337-y
- [10] Z. Xie, J. Chen, H. Liu, R. Chen, X. Yang, S. Song, Y. Zhang. *Horticulturae*, **10** (9), 990 (2024). DOI: 10.3390/horticulturae10090990
- [11] M.W. van Iersel. In: S. Dutta Gupta (editor). *Light Emitting Diodes for Agriculture* (Springer, Singapore, 2017), p. 59–80. DOI: 10.1007/978-981-10-5807-3_4
- [12] F. Bantis, S. Smirnakou, T. Ouzounis, A. Koukounaras, N. Ntagkas, K. Radoglou. *Scientia Horticulturae*, **235**, 437 (2018). DOI: 10.1016/j.scienta.2018.02.058
- [13] T. Kozai, G. Niu. *Plant Factory* (Academic Press, Burlington, 2016), p. 69–90. DOI: 10.1016/B978-0-12-801775-3.00004-4
- [14] T. Kozai, G. Niu. *Plant factory* (second edition) (Academic Press, Burlington, 2020), p. 7–34. DOI: 10.1016/B978-0-12-816691-8.00002-9
- [15] B. Matysiak, E. Ropelewska, A. Wrzodak, A. Kowalski, S. Kaniszewski. *Agronomy*, **12** (5), 1026 (2022). DOI: 10.3390/agronomy12051026
- [16] D. Singh, C. Basu, M. Meinhardt-Wollweber, B. Roth. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **49**, 139 (2015). DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.117
- [17] L.G. Izzo, M.A. Mickens, G. Aronne, C. Gómez. *Physiologia Plantarum*, **4** (172), 2191 (2021). DOI: 10.1111/ppl.13395
- [18] J.H. Lee, Y.B. Kwon, I.L. Choi, H.S. Yoon, J. Kim, Y. Kim, H.M. Kang. *Horticulturae*, **10** (8), 860 (2024). DOI: 10.3390/horticulturae10080860
- [19] B.S. Wu, Y. Hitti, S. MacPherson, V. Orsat, M.G. Lefsrud. *Environ. Exp. Bot.*, **171**, 103953 (2020). DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.103953
- [20] D. Dannehl, T. Schwend, D. Veit, U. Schmidt. *Frontiers in Plant Science*, **12**, 611236 (2021). DOI: 10.3389/fpls.2021.611236
- [21] Т.Э. Кулешова, О.Р. Удалова, И.Т. Балашова, Л.М. Аникина, П.Ю. Конончук, Г.В. Мирская, Г.Г. Панова. *Овощи России*, **4**, 65 (2021). DOI: 10.18619/2072-9146-2021-4-65-70
- [22] J. Chen, F. Ji, R. Gao, D. He. *Frontiers in Plant Science*, **15**, 1465004 (2024). DOI: 10.3389/fpls.2024.1465004
- [23] J. Zou, C.-B. Zhou, H. Xu, R.-F. Cheng, Q.-C. Yang, T. Li. *J. Integrative Agriculture*, **19** (8), 2027 (2020). DOI: 10.1016/S2095-3119(20)63209-9
- [24] С.А. Романенко, С.Б. Туранов. *Матер. XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием в рамках IV Всерос. светотехнического форума с междунар. участием*, (Саранск, 2017), с. 284.
- [25] И.Н. Черноусов. *Труды междунар. науч.-практич. конф. „Агрофизика XXI века“* (СПб., 2002), с. 203–206.
- [26] И.Н. Черноусов. В сб.: *Регулируемая система в растениеводстве и экофизиологии* (СПб., 2007), с. 43–53.
- [27] Г.Г. Панова, И.Н. Черноусов, О.Р. Удалова, А.В. Александров, И.В. Карманов, Л.М. Аникина, В.Л. Судаков, В.П. Якушев. *Докл. Российской академии сельскохозяйственных наук*, **4**, 17 (2015).
- [28] Т.Э. Кулешова, И.Н. Черноусов, О.Р. Удалова, Л.М. Аникина, Ю.В. Хомяков, А.В. Александров, И.С. Середин, С.В. Феофанов, С.А. Щеглов, Н.Р. Галль, Г.Г. Панова. *Биофизика*, **1** (65), 112 (2020). DOI: 10.31857/S0006302920010147
- [29] Т.Э. Кулешова, О.Р. Удалова, И.Т. Балашова, Л.М. Аникина, П.Ю. Конончук, Г.В. Мирская, В.И. Дубовицкая, В.Е. Вертебный, Ю.В. Хомяков, Г.Г. Панова. *ЖТФ*, **7** (92), 1060 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.07.52663.343-21
- [30] Т.Э. Кулешова, П.В. Желначева, Д.В. Русаков, Е.Н. Волкова, З.А. Гасиева, А.С. Галушко, Г.Г. Панова. *Агрофизика*, **4**, 8 (2023). DOI: 10.25695/AGRPH.2023.04.02
- [31] Т.Э. Кулешова, П.В. Желначева, Е.М. Эзерина, В.Е. Вертебный, Ю.В. Хомяков, Г.Г. Панова, А.А. Кочетов, Н.Г. Синявина. *Физиология растений*, **2** (71), 243 (2024). DOI: 10.31857/S0015330324020105
- [32] Г.Г. Панова, М.А. Левинских, А.Б. Новак, В.В. Родькин, А.В. Тепляков, И.Т. Балашова, А.М. Артемьева, Д.М. Швед, О.Р. Удалова, Г.В. Мирская, Т.Э. Кулешова, Ю.В. Хомяков, Ю.В. Чесноков. *Сельскохозяйственная биология*, **5** (59), 910 (2024). DOI: 10.15389/agrobiol.2024.5.910rus
- [33] Н.Г. Синявина, Г.Г. Панова, Т.Э. Кулешова, Ю.В. Чесноков. *Сельскохозяйственная биология*, **59** (5), 869 (2024). DOI: 10.15389/agrobiol.2024.5.869rus
- [34] Г.Г. Панова, М.А. Левинских, А.В. Тепляков, Д.А. Башмашников, О.Р. Удалова, Ю.В. Хомяков, Д.М. Швед, Ю.В. Чесноков. *Российские полярные исследования*, **3** (61), 18 (2025).
- [35] А.Б. Курина, К.О. Железнова, А.Е. Соловьева, Н.Г. Синявина, Г.Г. Панова, А.М. Артемьева. *Сельскохозяйственная биология*, **58** (5), 889 (2023). DOI: 10.15389/agrobiol.2023.5.889rus
- [36] R. Matsui, M.Z.B. Zulkifli, T.A. Kumaki. 24th Intern. Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT) (IEEE, 2025), с. 355–360.
- [37] J. Xiang, J. Chang, C. Chen, S. Jin, R. Chen, R. Gao, M. Jin, C. Guo. *J. Mater. Chem. C*, **4** (13), 1538 (2025). DOI: 10.1039/D4TC04641B

- [38] E.V. Kanash, T.E. Kuleshova, E.M. Ezerina, D.V. Rusakov, N.V. Kocherina, A.V. Dobrokhoto, O.A. Gorshkov, G.G. Panova, N.G. Sinyavina. *Horticulturae*, **12**, 74 (2026). DOI: 10.3390/horticulturae12010074
- [39] A.M. Артемьева, Н.Г. Синявина, Г.Г. Панова, Ю.В. Чесноков. *Сельскохозяйственная биология*, **56** (1), 103 (2021). DOI: 10.15389/agrobiology.2021.1.103rus
- [40] K.V. Egorova, N.G. Sinyavina, A.M. Artemyeva, N.V. Kocherina, Yu.V. Chesnokov. *Horticulturae*, **7** (12), 583 (2021). DOI: 10.3390/horticulturae7120583
- [41] I.A. Paponov, M. Paponov. *CABI Rev.*, **1** (20), 0008 (2025). DOI: 10.1079/cabireviews.2025.0008
- [42] L. Zheng, Z. Guo. *J. Luminescence*, **293**, 121792 (2026). DOI: 10.1016/j.jlumin.2026.121792
- [43] Z. Lin, X. Ma, W. Liu, T. Lin. *Computers and Electronics in Agriculture*, **242**, 111349 (2026). DOI: 10.1016/j.compag.2025.111349
- [44] E.V. Kanash, Yu.A. Osipov. *Precision Agriculture 2009 — Papers Presented at the 7th European Conference on Precision Agriculture*. Ed. by: E.J. van Henten, D. Goense, C. Lokhorst (Wageningen, ECPA 2009), p. 81–88. DOI: 10.3920/978-90-8686-664-9
- [45] E.V. Kanash, G.G. Panova, S.Yu. Blokhina. *Acta Horticulturae*, **1009**(ISHS), 37 (2013). DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.1009.2
- [46] D. Rusakov, E. Kanash. *Plant, Soil and Environment*, **32** (68), 137 (2022). DOI: 10.17221/483/2021-PSE
- [47] E.V. Kanash, N.G. Sinyavina, D.V. Rusakov, K.V. Egorova, G.G. Panova, Yu.V. Chesnokov. *Horticulturae*, **11** (9), 1185 (2023). DOI: 10.3390/horticulturae9111185
- [48] Z. Wang, H. Huang, M. Shi, Y. Xiong, J. Wang, Y. Wang, J. Zou. *Horticulturae*, **11** (7), 779 (2025). DOI: 10.3390/horticulturae11070779
- [49] G.G. Panova, A.V. Teplyakov, A.B. Novak, M.A. Levinskikh, O.R. Udalova, G.V. Mirskaya, Yu.V. Khomyakov, D.M. Shved, E.A. Ilyin, T.E. Kuleshova, E.V. Kanash, Yu.V. Chesnokov. *Agronomy*, **12** (13), 3038 (2023). DOI: 10.3390/agronomy13123038
- [50] В.А. Чесноков, Е.Н. Базырина, Т.М. Бушуева, Н.Л. Ильинская. *Выращивание растений без почвы* (ЛГУ, Л., 1960)
- [51] С.В. Зеленцов, Е.В. Мошненко, Л.А. Бубнова, Е.Н. Будников, М.В. Трунова, А.В. Лукомец, С.А. Рамазанова, Н.В. Дорофеев, Н.Б. Катышева, А.В. Поморцев. *Масличные культуры*, **1** (181), 132 (2020). DOI: 10.25230/2412-608X-2020-1-181-132-139
- [52] D.A. Sims, J.A. Gamon. *Remote Sens. Environ.*, **81**, 337 (2002).
- [53] J. Penuelas, F. Barret, I. Filella. *Int. J. Remote Sens.*, **14**, 1887 (1993).
- [54] A.A. Gitelson, Y. Zur, O.B. Chivkunova, M.N. Merzlyak. *Photochem. Photobiol.*, **3** (75), 272 (2002).
- [55] J.A. Gamon, L. Serrano, J.S. Surfus. *Physiol. Comp. Oecol.*, **112**, 492 (1997).
- [56] A.A. Gitelson, M.N. Merzlyak, O.B. Chivkunova. *Photochem. Photobiol.*, **71**, 38 (2001).
- [57] M. Kitajima, W.L. Butler. *BBA, Biochim. Biophys. Acta, Bioenerg.*, **376**, 105 (1975).
- [58] B. Genty, J.M. Briantais, N.R. Baker. *BBA, Biochim. Biophys. Acta, Gen. Subj.*, **990**, 87 (1989).
- [59] B. Genty, J. Harbinson, A.L. Cailly. *Proc. 3rd BBSRC Robert Hill Symposium on Photosynthesis* (March 31 – April 3, 1996) (University of Sheffield, Western Bank, Sheffield, UK), 28 (1996).
- [60] U. Schreiber, U. Schliwa, W. Bilger. *Photosynth. Res.*, **10**, 51 (1986).
- [61] А.И. Ермаков, В.В. Арасимович, М.Н. Смирнова-Иконникова, Н.П. Ярош, Г.А. Луковникова. *Методы биохимического исследования растений*, под ред. А.И. Ермакова (Агропромиздат, ЛО, 1987)
- [62] *Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства* (МУ N 5048-89, МЗ РСФСР, М., 1990)
- [63] И.М. Скурихин, В.А. Тутельян (ред.). *Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов* (Брандес, Медицина, М., 1998)
- [64] О.А. Горшков, М.В. Спиридонова, Е.М. Эзерина, Е.Н. Волкова, Т.Э. Кулешова. *Рисоводство*, **24**, 4 (69), 54 (2025). DOI: 10.33775/1684-2464-2025-69-4-54-63
- [65] Е.М. Эзерина, О.А. Громова, Д.В. Русаков, Ю.В. Чесноков. *Рисоводство*, **24**, 1 (66), 67 (2025). DOI: 10.33775/1684-2464-2025-66-1-67-76
- [66] B.S. Wu, S. MacPherson, M. Lefsrud. *Plants*, **10** (6), 1075 (2021). DOI: 10.3390/plants10061075
- [67] M. Mansoori, B.S. Wu, P.W. Addo, S. MacPherson, M. Lefsrud. *Scientia Horticulturae*, **322**, 112459 (2023). DOI: 10.1016/j.scienta.2023.112459
- [68] B.S. Wu, M. Mansoori, M. Schwalb, S. Islam, M.T. Naznin, P.W. Addo, S. MacPherson, W. Orsat, M. Lefsrud. *J. Photochem. Photobiology B: Biology*, **256**, 112939 (2024). DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2024.112939
- [69] A.F. Macedo, M.V. Leal-Costa, E.S. Tavares, C.L.S. Lage, M.A. Esquibel. *Environmental and Experimental Botany*, **1** (70), 43 (2011). DOI: 10.1016/j.envexpbot.2010.05.012
- [70] I.G. Tarakanov, D.A. Tovstyyko, M.P. Lomakin, A.S. Shmakov, N.N. Sleptsov, A.N. Shmarev, V.A. Litvinskiy, A.A. Ivlev. *Plants*, **11** (3), 441 (2022). DOI: 10.3390/plants11030441
- [71] A. Somma, Y. Liu, L.B. Nielen, S. Olchowski, E. Heuvelink, L.F. Marcelis. *Hort Science*, **60** (2), 163 (2025). DOI: 10.21273/hortsci18080-24
- [72] X. He, R. He, Y. Li, K. Liu, J. Tan, Y. Chen, X. Liu, H. Liu. *Agronomy*, **12** (10), 2322 (2022). DOI: 10.3390/agronomy12102322
- [73] Y. Luo, L. Ye, W.-Z. Guo, X. Zhang, Y.-H. Liu, X.-L. Chen. *Chinese J. Agrometeorology*, **45** (05), 506 (2024). DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2024.05.006
- [74] Q. Gao, Q. Liao, Q. Li, Q. Yang, F. Wang, J. Li. *Horticulturae*, **8** (12), 1165 (2022). DOI: 10.3390/horticulturae8121165
- [75] C. Hernández-Adasme, H. Silva, V. Escalona. *Italian J. Agronomy*, **17** (2), 1982 (2022). DOI: 10.4081/ija.2022.1982
- [76] J.H. Lee, Y.B. Kwon, Y.H. Roh, I.L. Choi, J. Kim, Y. Kim, H.S. Yoon, H.M. Kang. *Plants*, **12** (10), 2056 (2023). DOI: 10.3390/plants12102056
- [77] X. Ke, H. Yoshida, S. Hikosaka, E. Goto. *Frontiers in Plant Science*, **15**, 1393918 (2024). DOI: 10.3389/fpls.2024.1393918
- [78] M.C. Snowden, K.R. Cope, B. Bugbee. *PloS one*, **11** (10), e0163121 (2016). DOI: 10.1371/journal.pone.0163121
- [79] B. Frąszczak, M. Kula-Maximenko. *Agronomy*, **11** (6), 1211 (2021). DOI: 10.3390/agronomy11061211
- [80] A.A. Alrajhi, A.S. Alsahli, I.M. Alhelal, H.Z. Rihan, M.P. Fuller, A.A. Alsadon, A.A. Ibrahim. *Plants*, **12** (3), 463 (2023). DOI: 10.3390/plants12030463
- [81] P. Chutimanukul, P. Piew-Ondee, T. Dangsam, A. Thongtip, S. Janta, P. Wanichananan, O. Thepsilvisut, H. Ehara, P. Chutimanukul. *Horticulturae*, **10** (10), 1059 (2024). DOI: 10.3390/horticulturae10101059

- [82] P. Kusuma, B. Swan, B. Bugbee. *Plants*, **10** (4), 637 (2021). DOI: 10.3390/plants10040637
- [83] Q. Meng, E.S. Runkle. *Plants*, **12** (5), 1127 (2023). DOI: 10.3390/plants12051127
- [84] S. Luo, J. Zou, M. Shi, S. Lin, D. Wang, W. Liu, Y. Shen, X. Ding, Y. Jiang. *Plant, Soil & Environment*, **70** (5), 305 (2024). DOI: 10.17221/480/2023-PSE
- [85] Z. Yan, L. Wang, J. Cheng, D. Lin, Y. Yang. *Intern. J. Agricultural and Biol. Eng.*, **15** (6), 60 (2022). DOI: 10.25165/ijabe.20221506.7351
- [86] N.C. Yorio, G.D. Goins, H.R. Kagie, R.M. Wheeler, J.C. Sager. *Hort Science*, **36** (2), 380 (2001).
- [87] S.J. Mohamed, H.Z. Rihan, N. Aljafer, M.P. Fuller. *Plants*, **10** (10), 2162 (2021). DOI: 10.3390/plants10102162
- [88] О.А. Громова, Е.М. Эзерина, Н.В. Кочерина, А.М. Улимбашев, Ю.В. Чесноков. *Агрофизика*, **2** (30), 30 (2024). DOI: 10.25695/AGRPH.2024.02.04