

ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА И МИКРООРГАНИЗМОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ СОРТОВ *Ocimum basilicum**

В.К. ТОХТАРЬ¹ , М.Ю. ТРЕТЬЯКОВ¹, Л.А. ТОХТАРЬ¹, Е.В. ЖУРАВЛЕВА²,
А.В. СИБИРЕВ³, Д.В. БИРЮКОВ¹, В.А. ЧЕРНЫХ¹

Выращивание микрозелени в условиях закрытого грунта — перспективное направление хозяйственной деятельности, поскольку позволяет получать эффективную прибыль для производителя и при этом удовлетворить круглогодичный спрос на продукцию в городских условиях. Развитие технологий выращивания растений в условиях закрытого грунта в настоящее время связано с применением светодиодов (LED). Анализ научной литературы показывает, что изменения спектрального состава света неодинаково влияют на рост и развитие, а также фотосинтетические процессы и продуктивность различных видов растений в условиях *in vivo* и *in vitro*. При этом влияние на рост и развитие растений штаммов бактерий совместно с действием света различного спектрального состава практически не рассматривается. Развитие технологии освещения и расширение возможностей использования контролируемых спектров невозможно без точного понимания того, как изменения спектрального состава света могут повлиять на рост, развитие и биохимию пряно-ароматических растений, выращивание которых имеет огромный потенциал. Одной из ключевых проблем, связанных с оценкой совместного действия света и микроорганизмов на растения, остается точная фиксация происходящих в них изменений. В этой связи использование современных инструментальных неинвазивных методов и подходов к анализу фенотипа растений в регулируемых условиях среды служит важной основой быстрого получения больших объемов экспериментальных данных. В настоящей работе впервые выявлен характер влияния комбинаций ростостимулирующих и симбиотических микроорганизмов и спектров света на рост и развитие сортов базилика душистого. Целью исследования была комплексная оценка влияния света различного спектрального состава и процессов биотизации на морфофизиологические параметры роста сортов *Ocimum basilicum* при культивировании на светодиодных фитостеллажах. Работу проводили с использованием приборной базы УНУ Ботанический сад НИУ БелГУ в период с 19 марта по 29 апреля 2025 года. Объектами исследования были растения *O. basilicum* четырех сортов, относящихся к двум группам, которые различались по окраске листьев: пурпурные (Пурпурные звезды, Русский гигант) и зеленые (Бутербродный лист, Тонус). Семена высевали в пластиковые сосуды Р9 объемом 0,5 л. Чтобы оценить действие микроорганизмов, использовали микробиологические препараты БСка-3 (ООО «Биотехагро», Россия) и БиоАзФК (ООО «НВП «БашИнком», Россия). Растения культивировали на фитостеллажах X-bright Fito Spectr V1.0 (ООО «Электронные системы «БелГУ», Россия), оборудованных светодиодными источниками освещения с возможностью регулировки спектрального состава и интенсивности излучения. Спектральный состав света оценивали с помощью спектрометра UPRtek MK 350D («UPRtek», Тайвань). В эксперименте рассматривали отклик растений на воздействие комбинаций освещения в трех спектральных диапазонах области фотосинтетически активной радиации (ФАР) (синем, зеленом, красном) и совместное действие микробиологических препаратов и режимов освещения. Для оценки морфофизиологических характеристик растений использовали 3D мультиспектральный лазерный сканер PlantEye F500 («PhenospeX», Нидерланды). Полученные экспериментальные данные свидетельствовали об увеличении цифровой биомассы растений, показателей нормализованного индекса хлорофиллов (NPCI), индекса старения листьев (PCRI) и их оттенка (Hue) у четырех сортов базилика при воздействии изученных факторов. Установлено, что использование микроорганизмов может снижать темпы набора вегетативной массы растений, однако при этом происходит увеличение активности синтеза пигментов. Воздействие на растения сортов базилика различных спектров света и микроорганизмов в ряде случаев приводило к синергетическому эффекту в отношении роста и развития растений. Установлены различия в реакции пурпурнолистных и зеленолистных сортов на воздействие неодинакового спектрального состава света. Выявлен оптимальный спектральный состав света для сортов с зелеными листьями (PPFD 405,2; PPFD-B 2,5; PPFD-G 2,3; PPFD-R 400,4), который способствует росту значений цифровой биомассы. Повышение содержания пигментов в зеленолистных сортах достигалось с помощью применения следующего спектрального состава света: PPFD 400; PPFD-B 94,1; PPFD-G 202,1; PPFD-R 103,9. У краснолистных сортов базилика душистого набор биомассы происходил интенсивнее при использовании волн синего (сорт Пурпурные звезды — 211,2 см³) и белого

* Исследование выполнено за счет гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для реализации крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития (проект № 075-15-2024-540).

спектрального состава света (сорт Русский гигант — 307,0 см³). Полученные данные могут быть использованы в производстве для увеличения массы микрозелени и уменьшения затрат на освещение при культивировании растений *Ocimum basilicum* в условиях закрытого грунта.

Ключевые слова: *Ocimum basilicum*, спектральный состав света, микроорганизмы, морфофизиологические параметры, состояние растений, неинвазивная оценка.

В настоящее время выращивание микрозелени — одно из ключевых направлений для закрытого грунта (1). Этот сегмент рынка представляет одну из наиболее прибыльных и быстрорастущих отраслей в секторе оптовой торговли продуктами, где прогнозируемая глобальная рыночная стоимость, согласно прогнозам рынка, должна достигнуть 2,61 млрд долларов к 2029 году (2). Салатно-зеленные культуры входят в тройку наиболее распространенных овощных растений в теплицах России (3). Несмотря на это, потребительский спрос на богатую витаминами зеленую продукцию в холодное время года удовлетворяется не более чем на 20-30 % (4).

Базилик душистый (*Ocimum basilicum* L.) относится к наиболее востребованным эфиромасличным зеленым культурам (5-7). Ускорение процессов, связанных с ростом биомассы и получения качественной продукции, становится необходимым условием повышения рентабельности производства (2, 8-10). В последнее время все шире используются системы интенсивного культивирования — так называемые фабрики растений (1, 2, 11), в которых применяются установки вертикального многоярусного выращивания салатно-зеленных растений (12-15), а в качестве источников света используются более экономичные, чем обычные лампы, светодиоды (1, 16-18). В связи с этим особый интерес представляет внедрение технологий, позволяющих проводить контролируруемую точную регулировку факторов, влияющих на рост и развитие растений.

Анализ научной литературы показывает, что изменения спектрального состава света неодинаково влияют на рост и развитие, а также фотосинтетические процессы и продуктивность различных видов растений в условиях *in vivo* и *in vitro* (18-21). Адаптация к световому режиму затрагивает различные уровни организации автотрофов, что в итоге приводит к оптимизации функционирования взаимодействующих между собой систем растений. Ориентированные на практическое применение инновационные подходы воздействия на растения различными режимами освещения позволяют эффективно регулировать производство такой продукции (14, 22).

Результаты опытов по воздействию различного спектрального состава света на растения *O. basilicum* широко представлены как в отечественных, так и зарубежных журналах (16, 23-26). При этом практически не рассматривается влияние на рост и развитие растений штаммов бактерий родов *Azospirillum* (27), *Azotobacter* (28), *Bacillus* (29, 30), *Bradyrhizobium* (31), *Burkholderia* (32), *Pseudomonas* (30, 33), *Rhizobium* (34), *Streptomyces* (35, 36) и др. (37) (бактеризация) и грибов *Pisolithus tinctorius* (38), *Sclerotium polyrhizum* (38), *Trichoderma asperellum* (39), *Trichoderma viride* (40) и др. (микоризация) в сочетании со светом различного спектрального состава. В литературе отмечен явный положительный эффект от действия симбиотических микроорганизмов на *O. basilicum* (8). Поэтому подбор оптимального состава спектров света и ростостимулирующих бактерий должен повысить количество и качество выращиваемой продукции с одновременным снижением затрат на использование электроэнергии, особенно в масштабах крупных тепличных хозяйств.

Одной из ключевых проблем, связанных с оценкой совместного действия света и микроорганизмов на растения, остается точная фиксация происходящих в них изменений. При этом процессы, сопутствующие про-

ведению измерений, способны нарушать микроклиматические условия эксперимента, а механические воздействия на растения вызывают кратковременный стресс. Кроме того, возникает вероятность ошибок, обусловленных как человеческим фактором, так и большим объемом обрабатываемых данных. В этой связи использование современных инструментальных неинвазивных методов и подходов к анализу фенотипа растений в регулируемых условиях среды служит важной основой быстрого получения больших объемов экспериментальных данных. Их применение дает возможность не только значительно увеличить число экспериментальных образцов и частоту проводимых измерений, но и кардинально повысить качество получаемых данных.

В настоящей работе впервые выявлен характер влияния комбинаций ростостимулирующих симбиотических микроорганизмов и спектров света на рост и развитие у сортов базилика душистого. Полученные результаты позволяют создать оптимальные условия выращивания изученных растений для увеличения их биомассы и содержания пигментов в условиях закрытого грунта.

Целью исследования была комплексная оценка влияния света различного спектрального состава и процессов биотизации на морфобиологические параметры роста сортов *Ocimum basilicum* при культивировании на светодиодных фитостеллажах.

Методика. Работу проводили с использованием приборной базы УНУ Ботанический сад НИУ БелГУ в период с 19 марта по 29 апреля 2025 года. Объектами исследования были растения *O. basilicum* четырех сортов, относящихся к двум группам, которые различались по окраске листьев: пурпурные (Пурпурные звезды — производитель семян ООО «Центрогородник», Россия; Русский гигант — производитель семян ООО «Группа компаний «Гавриш», Россия) и зеленые (Бутербродный лист — производитель семян ООО «Группа компаний «Гавриш», Россия; Тонус — производитель семян Агрохолдинг «Поиск», Россия).

Семена высевали в пластиковые вегетационные сосуды Р9 объемом 0,5 л. Субстратом служил нейтральный минерализованный верховой сфагновый торф марки Агробалт-С (ООО «Завод Флора», Россия) со следующими характеристиками: N = 150 мг/л, P₂O₅ = 150 мг/л, K₂O = 250 мг/л, Mg = 30 мг/л, Ca = 120 мг/л, pH 5,5–6,6.

Чтобы оценить действие микроорганизмов, использовали препараты БСка-3 (ООО «Биотехагро», Россия), в состав которого входили *Trichoderma viride* 256 (ВКПМ F-294), *Pseudomonas koreensis* Ap33 (ВКПМ B-3481) — $2,5 \times 10^8$ КОЕ/см³, *Bacillus subtilis* 17 (*Bacillus acidocaldarius*) (ВКПМ B-5250) — $2,5 \times 10^8$ КОЕ/см³, *Bradyrhizobium japonicum* (*Rhizobium japonicum*) 614a (ВКПМ B-1978) — $2,5 \times 10^8$ КОЕ/см³, и БиоАзФК (ООО «НВП «БашИнком», Россия), в состав которого входили *Bacillus megaterium* и *Bacillus mucilaginosus* (титр не менее 1×10^8 КОЕ/мл), *Azotobacter chroo-coccum* (титр не менее 1×10^7 КОЕ/мл). Комплексы микроорганизмов включали фосфор- и калиймобилизующие, а также азотфиксирующие бактерии. Их вносили в грунт после посева семян с нормой расхода, рекомендованной производителем для микробиологических удобрений — 2,0–3,0 л/га.

Растения культивировали на фитостеллажах X-bright Fito Spectr V1.0 (ООО «Электронные системы БелГУ», Россия), оборудованных светодиодными источниками освещения с возможностью регулировки спектрального состава и интенсивности излучения. Спектральный состав света оценивали с помощью спектрометра UPRtek MK 350D («UPRtek», Тайвань). В эксперименте рассматривали отклик растений на воздействие

комбинаций освещения в трех спектральных диапазонах области фотосинтетически активной радиации (ФАР) (синем, зеленом, красном) и совместное действие микробиологических препаратов и режимов освещения.

Температура воздуха поддерживалась в пределах 24 ± 2 °С, влажность — 50 %. Продолжительность светового периода составляла 16 ч. Опыскивание растений осуществляли ежедневно, полив объемом воды не более 50 мл на каждую емкость — один раз в двое суток.

Для оценки морфофизиологических характеристик растений использовали 3D мультиспектральный лазерный сканер PlantEye F500 («Phenorex», Нидерланды). Измерения начали проводить на 10-е сут после высева семян и продолжали в течение 40 сут. Начало проведения измерений было связано с тем, что именно к 10-м сут формировались растения, которые можно было исследовать с применением технологии машинного зрения. Растения измеряли ежедневно (за исключением выходных дней). Общая тенденция их роста и развития оставалась одинаковой, поэтому для визуализации и представления данных был выбран 4-суточный диапазон, который достаточно информативно отражал изменения, происходящие в течение всего эксперимента. В сумме время развития растений составило 50 сут, что соответствует сроку выращивания базилика в тепличных хозяйствах.

Оценивали влияние действующих факторов на следующие показатели: цифровая биомасса, оттенок листьев, нормализованный индекс хлорофиллов, индекс старения листьев.

Цифровая биомасса (digital biomass, см³) — наиболее информативная характеристика морфологического состояния растений, поскольку рассчитывается как произведение высоты и площади 3D листа, при этом значительно коррелирует с указанными характеристиками (41).

Оттенок листьев (Hue, диапазон значений от 0 до 360° цветового круга) вычисляли, оценивая облако точек сканирования листьев, с учетом трех измеренных цветов (красного, зеленого и голубого), что позволяет получить точную оценку цветности (42).

Нормализованный индекс хлорофиллов (normalized pigment chlorophyll ratio index, NPCI, диапазон значений от -1 до 1) — показатель, который измеряется при длине флуоресцентной волны, возбужденной в синем свете (UV-лучах). Он сравнивается с длиной флуоресцентной волны, возбужденной в красном свете. Разница в возбуждении при разных максимумах позволяет вычислить цифровые значения, коррелирующие с содержанием хлорофилла, по формуле $(R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$ (43).

Индекс старения листьев (plant senescence reflectance index, PSRI, диапазон значений от -1 до 1) предназначен для оценки соотношения каротиноидов (например, α -каротина и β -каротина) к хлорофиллу. Показатель рассчитывали по разнице возбуждения в разных максимумах по формуле $(R_{680} - R_{480}) / R_{750}$. Чем выше значение PSRI, тем активнее процессы разрушения хлорофилла (старения листьев) (44).

Для объективной оценки влияния спектрального состава света и действия микроорганизмов на растения использовали расчет темпов прироста NPCI и PSRI по базисному методу: $TP = (P_k - P_n) / P_n \times 100 \%$, где P_k — конечные значения показателя, P_n — начальные значения показателя.

Статистическую обработку данных проводили по 10 растениям каждого сорта в каждом варианте опыта. Рассчитывали средние арифметические значения (M) и доверительные интервалы ($\pm CI$) при доверительном уровне $p = 0,05$. Влияние света и процессов биотизации на растения

оценивали на основе двухфакторного дисперсионного анализа. Отдельно для каждого сорта рассчитывали сумму квадратов (SS), степени свободы (df), средние квадраты (MS), а также значение критерия Фишера (F) в программе Microsoft Excel.

Результаты. Спектральный состава света в разных вариантах эксперимента представлен в таблице 1.

1. Спектральный состав света в опытах по выращиванию *Ocimum basilicum* на светодиодных фитостеллажах (УНУ НОЦ Ботанический сад НИУ БелГУ, 19 марта-29 апреля 2025 года)

| Показатели освещения | Вариант освещения и процентные отношения спектров света | | | | | |
|-----------------------------------|---|--------|---------|--------|---------|--------|
| | белый | | синий | | красный | |
| PPFD мкмоль/(м ² ·с) | 400,1±5 | | 402,7±5 | | 405,2±5 | |
| PPFD-B мкмоль/(м ² ·с) | 94,1 | 23,5 % | 382,2 | 94,9 % | 2,5 | 0,6 % |
| PPFD-G мкмоль/(м ² ·с) | 202,1 | 50,5 % | 12,3 | 3,1 % | 2,3 | 0,6 % |
| PPFD-R мкмоль/(м ² ·с) | 103,9 | 26,0 % | 8,2 | 2,0 % | 400,4 | 98,8 % |

При оценке влияния спектрального состава света на растения в опытах без применения удобрений было установлено, что три используемые комбинации освещения по-разному влияли на динамику изменения цифровой биомассы у сортов *O. basilicum* (рис. 1).

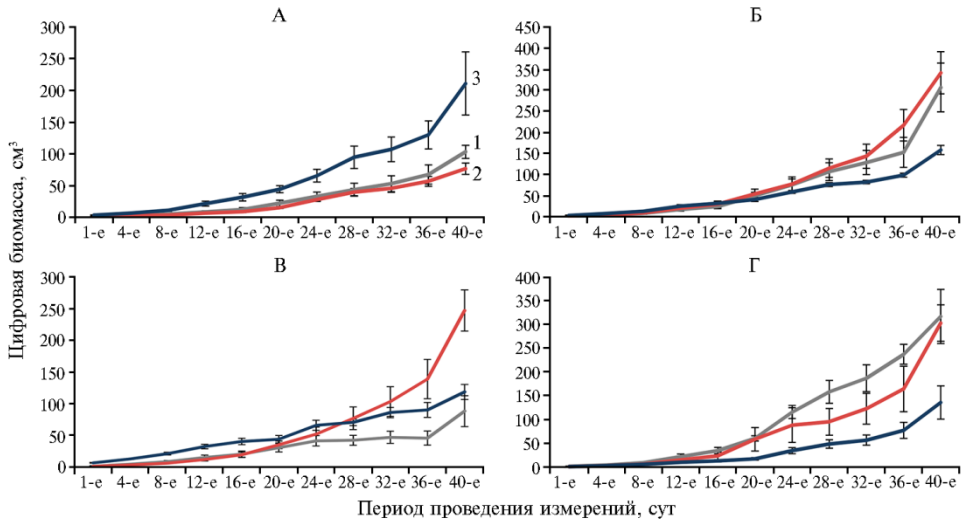


Рис. 1. Цифровая биомасса растений *Ocimum basilicum* разных сортов, выращиваемых на светодиодных фитостеллажах, под воздействием света разного спектрального состава, в зависимости от времени выращивания: 1 — белый, 2 — красный, 3 — синий; А — Пурпурные звезды, Б — Русский гигант, В — Бутербродный лист, Г — Тонус ($n = 10$, $M \pm CI$, УНУ НОЦ Ботанический сад НИУ БелГУ, 19 марта-29 апреля 2025 года). Спектральный состав света см. в таблице 1.

Красный и белый свет оказались наиболее эффективными для роста сортов Тонус и Русский гигант. Их цифровая биомасса к концу эксперимента варьировала соответственно в пределах 303,2-317,0 и 307,0-341,8 см³. Красный свет положительно влиял на рост и развитие у сорта Бутербродный лист: среднее значение цифровой биомассы растений достигало 246,9 см³. Синий свет оказывал наибольшее позитивное влияние на успешное формирование цифровой биомассы растений сорта Пурпурные звезды (211,2 см³). Сорта, которые одновременно положительно отзывались на воздействие двух разных комбинаций (красного и белого) характеризовались существенно большим объемом цифровой биомассы.

Важное значение для оценки состояния растений представляет анализ влияния света различного спектрального состава на накопление пигментов. Значимым показателем при этом служит содержание суммы хло-

рофиллов и каротиноидов, которое оценивалось по темпам прироста индексов NPCI и PSRI (табл. 2).

2. Прирост (%) индексов NPCI и PSRI у растений *Ocimum basilicum* разных сортов, выращиваемых на светодиодных фитостеллажах, под воздействием света разного спектрального состава (УНУ НОЦ Ботанический сад НИУ БелГУ, 19 марта-29 апреля 2025 года)

| Сорт | Спектральный состав света | | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | белый | | красный | | синий | |
| | индексы оценки состояния растений | | | | | |
| | NPCI | PSRI | NPCI | PSRI | NPCI | PSRI |
| Пурпурные звезды | 189,1 | 112,4 | 158,3 | 140,0 | 200,0 | 150,0 |
| Русский гигант | 180,0 | 150,0 | 37,5 | -28,6 | 55,6 | 0,0 |
| Бутербродный лист | 97,3 | 107,6 | 63,4 | 113,6 | 48,7 | 85,8 |
| Тонус | 312,5 | 433,3 | 146,7 | 200,0 | 160,0 | 200,0 |


Примечание. Спектральный состав света см. в таблице 1. NPCI — нормализованный индекс хлорофиллов, PSRI — индекс старения листьев.

Из представленных данных следует, что наибольшие темпы прироста NPCI и PSRI были отмечены для сорта Тонус (соответственно 312,5 и 433,3 %). Высокие темпы прироста индексов NPCI по сравнению с другими сортами отмечены у сорта Пурпурные звезды при использовании света красного и синего спектрального состава (158,3 и 200,0 %). Варьирование темпов прироста у сортов распределилось следующим образом: Тонус (NPCI: белый — 312,5 %, красный — 146,7 %; PSRI: белый — 433,3 %, красный и синий — 200,0 %); Бутербродный лист (NPCI: белый — 97,3 %, синий — 48,7 %; PSRI: белый — 107,6 %, синий — 85,8 %); Русский гигант (NPCI: белый — 180,0 %, красный — 37,5 %; PSRI: белый — 150,0 %, красный — 28,6 %).

Синий свет оказался наиболее эффективным в случае культивирования сорта Пурпурные звезды как для формирования цифровой биомассы, так и накопления пигментов, участвующих в фотосинтезе. Это было обусловлено высоким накоплением антоцианов, что подтвердилось при анализе растений с помощью лазерного сканера посредством оценки показателя оттенка листьев (Hue) (табл. 3).

3. Интенсивность изменения оттенков листьев у растений *Ocimum basilicum* разных сортов, выращиваемых на светодиодных фитостеллажах, под воздействием света разного спектрального состава (УНУ НОЦ Ботанический сад НИУ БелГУ, 19 марта-29 апреля 2025 года)

| Сорт | Оттенок листьев (Hue), ° | | |
|-------------------------------------|--------------------------|------------|------------|
| | белый | красный | синий |
| Пурпурные звезды (темно-фиолетовый) | 24,6-101,9 | 10,8-183,5 | 18,9-101,9 |
| Русский гигант (темно-фиолетовый) | 46,0-206,0 | 2,73-350,2 | 47,5-269,0 |
| Бутербродный лист (зеленый) | 91,0-103,6 | 88,2-97,0 | 87,5-100,2 |
| Тонус (зеленый) | 93,0-110,8 | 89,7-103,4 | 94,4-110,1 |

Шкала оттенков Hue 

Примечание. Спектральный состав света см. в таблице 1.

У сортов с зеленой окраской листьев (Бутербродный лист и Тонус) оттенок менялся незначительно. Разница между максимальными и минимальными значениями составляла от 8,8° до 17,8° при воздействии света различного спектрального состава. У сортов, накапливающих в листьях антоцианы (Пурпурные звезды и Русский гигант), значения оттенков варьировали в большем диапазоне. Разница между максимальными и минимальными значениями этого параметра заметно зависела от используемого спектрального состава света и составляла от 77,3° до 347,5°. Широкий диапазон изменения оттенка листьев у краснолистных сортов в сравнении

с зеленолиственными был обусловлен большим разнообразием накапливаемых пигментов. Накопление антоцианов определяется, с одной стороны, генетическими особенностями сортов, с другой — влиянием внешних факторов среды.

В условиях закрытого грунта воздействие на растения различных спектров света в значительной степени влияет на оттенок листьев краснелистных сортов базиликов, что обусловлено изменением накопления антоцианов и физиологической стадией роста (45-48). Так, максимальное значение оттенка для сорта Пурпурные звезды при использовании белого и синего света составляло $101,9^\circ$, что соответствует зеленой части шкалы оттенка цветности. При этом белый свет содержал 26 %, а синий — 2 % от общего спектра красного света. Наибольшее накопление пигментов, определяющееся цветностью листьев и коррелирующее с накоплением антоцианов (42), у краснелистных сортов происходило при использовании красного света. Максимальное значение оттенка листьев у сорта Пурпурные звезды составило $183,5^\circ$, что соответствует сине-голубой части шкалы оттенка цветности, а у сорта Русский гигант — $350,2^\circ$ (красная часть шкалы). Значительное варьирование оттенка листьев у краснелистных сортов может быть связано с образованием в процессе роста и развития растений различных комбинаций и соотношений пигментов (45). Оценка накопления пигментов, а также цветности традиционно проводится методами, связанными с травмированием растений и возможным вмешательством в стандартные условия эксперимента. Использование 3D мультиспектрального лазерного сканера позволяет оперативно получать большие объемы точных данных о состоянии растений и реагировать на происходящие изменения. Все манипуляции при выполнении таких измерений проводятся неинвазивным способом.

Обработка почвы микроорганизмами способствует адаптации растений к различным условиям освещения. Во многих случаях это позволяет снизить стресс и повысить приспособительный потенциал в новых условиях культивирования (8, 30, 31). Одним из недостатков применения микробиологических препаратов считается низкий ответный отклик. Использование точных методов оценки морфофизиологических изменений позволяет выявить реакцию растений на внешнее воздействие. Именно поэтому применение машинных методов зрения перспективно при изучении действия микроорганизмов на рост и развитие растений.

В проведенном нами эксперименте по совместному влиянию микроорганизмов и спектров света различного состава использовались конгломераты микроорганизмов, зарекомендовавших себя в качестве перспективных стимуляторов роста, которые повышают адаптационный потенциал растений (49-51).

При совместном действии трех различных источников света и обработке почвы биопрепаратом БСка-3 влияние белого света оказалось наиболее благоприятным для формирования цифровой биомассы у сортов Пурпурные звезды ($162,9 \text{ см}^3$), Русский гигант ($345,8 \text{ см}^3$) и Тонус ($210,5 \text{ см}^3$). Растения сорта Бутербродный лист лучше набирали цифровую биомассу при использовании красного света ($327,8 \text{ см}^3$) (рис. 2). Необходимо отметить, что действие консорциума микроорганизмов в значительной степени увеличивало прирост цифровой биомассы, который без его применения составлял $246,9 \text{ см}^3$ (см. рис. 1, В).

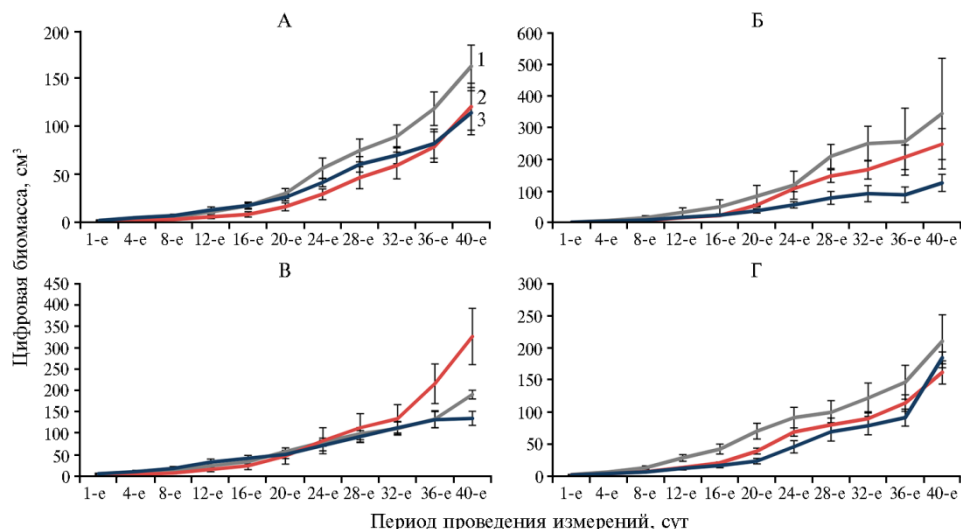


Рис. 2. Цифровая биомасса растений *Ocimum basilicum* разных сортов, выращиваемых на светодиодных фитостеллажах, под воздействием света разного спектрального состава и биопрепарата БСка-3 в зависимости от времени выращивания: 1 — белый, 2 — красный, 3 — синий; А — Пурпурные звезды, Б — Русский гигант, В — Бутербродный лист, Г — Тонус ($n = 10$, $M \pm CI$, УНУ НОЦ Ботанический сад НИУ БелГУ, 19 марта-29 апреля 2025 года). Спектральный состав света см. в таблице 1.

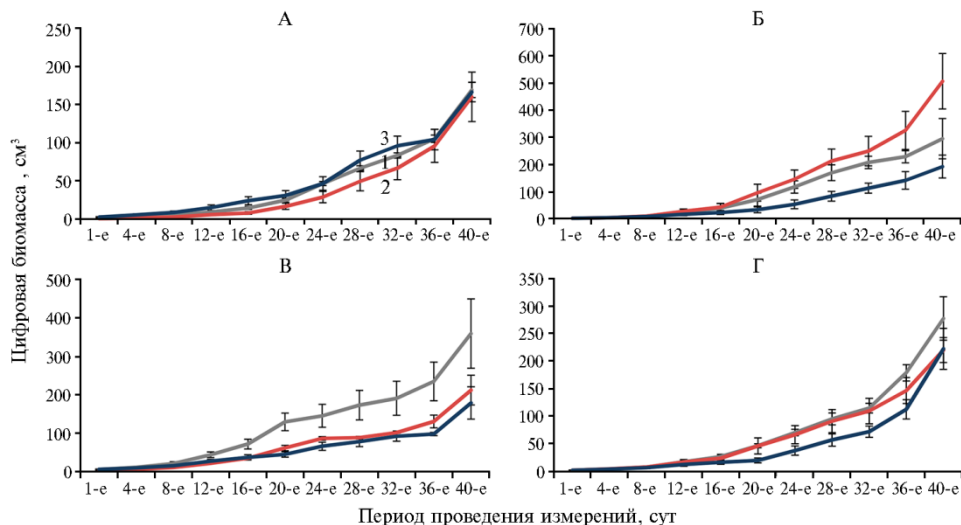


Рис. 3. Цифровая биомасса растений *Ocimum basilicum* разных сортов, выращиваемых на светодиодных фитостеллажах, под воздействием света разного спектрального состава и биопрепарата БиоАзФК в зависимости от времени выращивания: 1 — белый, 2 — красный, 3 — синий; А — Пурпурные звезды, Б — Русский гигант, В — Бутербродный лист, Г — Тонус ($n = 10$, $M \pm CI$, УНУ НОЦ Ботанический сад НИУ БелГУ, 19 марта-29 апреля 2025 года). Спектральный состав света см. в таблице 1.

Обработка препаратом БиоАзФК при одновременном воздействии на растения сорта Пурпурные звезды света различного спектрального состава не повлияла на формирование цифровой биомассы, значения которой варьировали от 160,0 до 169,0 см³ (рис. 3). Для сортов с зеленой окраской листьев (Бутербродный лист и Тонус) наилучший эффект имело воздействие белого спектра (358,8 см³ и 277,6 см³). Сорт Русский гигант при обработке микроорганизмами оказался наиболее отзывчивым на воздействие красного спектра (506,7 см³).

Поскольку исследуемые биологические объекты подвергались од-

новременному влиянию двух факторов — обработке микробиологически-ми комбинациями (фактор А) и воздействию света различного спектрального состава (фактор В), была проведена оценка достоверности различий между наборами значений наблюдаемых случайных величин методом дисперсионного анализа (табл. 4).

4. Результаты дисперсионного анализа для оценки влияния света различного спектрального состава и обработки биопрепаратами БСка-3 и БиоАзФК на растения *Ocimum basilicum* разных сортов, выращиваемых на светодиодных фитостеллажах (УНУ НОЦ Ботанический сад НИУ БелГУ, 19 марта-29 апреля 2025 года)

| Источник разброса | SS | df | MS | F |
|---------------------------------------|-----------|----|-----------|------|
| Бутербродный лист | | | | |
| Фактор А — обработка микроорганизмами | 60440,75 | 2 | 30220,38 | 3,65 |
| Фактор В — спектральный состав света | 83840,37 | 2 | 41920,18 | 5,06 |
| Взаимодействие факторов | 124287,41 | 4 | 31071,85 | 3,75 |
| Ошибка модели | 223776,98 | 27 | 8288,04 | |
| Тонус | | | | |
| Фактор А — обработка микроорганизмами | 30112,56 | 2 | 15056,28 | 2,83 |
| Фактор В — спектральный состав света | 45839,84 | 2 | 22919,92 | 4,31 |
| Взаимодействие факторов | 48282,94 | 4 | 12070,73 | 2,27 |
| Ошибка модели | 143696,26 | 27 | 5322,08 | |
| Пурпурные звезды | | | | |
| Фактор А — обработка микроорганизмами | 9108,15 | 2 | 4554,08 | 1,77 |
| Фактор В — спектральный состав света | 12224,57 | 2 | 6112,28 | 2,37 |
| Взаимодействие факторов | 34325,90 | 4 | 8581,48 | 3,33 |
| Ошибка модели | 69562,49 | 27 | 2576,39 | |
| Русский гигант | | | | |
| Фактор А — обработка микроорганизмами | 52600,07 | 2 | 26300,03 | 1,00 |
| Фактор В — спектральный состав света | 278971,14 | 2 | 139485,57 | 5,33 |
| Взаимодействие факторов | 98412,28 | 4 | 24603,07 | 0,94 |
| Ошибка модели | 706763,85 | 27 | 26176,44 | |

Примечание. SS — сумма квадратов, df — степени свободы, MS — средние квадраты, F — значение критерия Фишера. Фактор А — обработка микроорганизмами. Фактор В — спектральный состав света. Состав биопрепаратов см. в разделе «Методика». Спектральный состав света см. в таблице 1.

Из полученных данных дисперсионного анализа следует, что при уровне значимости $\alpha = 0,05$ действие изученных факторов на цифровую биомассу различалось и было связано с сортовыми свойствами вне зависимости от принадлежности растений к группе пурпурно- или зеленолистных культиваров. Так, для сорта Бутербродный лист факторы А и В оказывали друг на друга значительное влияние. Сорт Тонус оказался менее отзывчивым на влияние фактора А. При этом влияние фактора В и различия средних значений выборок не могло быть объяснено лишь случайностью, а взаимосвязь между факторами не прослеживалась. Одновременное действие двух факторов на сорт Пурпурные звезды оказывало согласованное воздействие. Влияние этих же факторов на изменение цифровой биомассы у сорта Русский гигант отсутствовало или было незначительным.

Сравнительный анализ комплексного воздействия микроорганизмов и спектров света на сорта базилика свидетельствует о том, что успешно подобранная комбинация этих факторов способна эффективно регулировать рост и развитие растений. Установлено, что использование одной и той же части спектра при воздействии на растения разных микроорганизмов по-разному влияет на развитие сортов *Ocimum basilicum*.

При совместном действии биопрепаратов, а также белого и красного света у сорта Тонус были отмечены наиболее высокие темпы пророста значений содержания хлорофилла и каротиноидов по сравнению с другими исследуемыми комбинациями (белый: NPCI — 275,0 и 300,0 %, PSRI — 400,0 и 400 %; красный: NPCI — 236,4 и 236,4 %, PSRI — 375,0 и 375,0 %). Синяя часть спектра замедляла образование пигментов (NPCI — 127,3 % и 125,0 %, PSRI — 60,0% и 100,0%). Обработка субстрата, в кото-

рый высевали сорт Пурпурные звезды, биопрепаратом БСка-3 способствовала наибольшим темпам прироста (NPCI — 285,7 %, PSRI — 266,7 %) при воздействии белого света и максимальными темпам прироста относительно других сортов при воздействии синего света (NPCI — 212,5 %, PSRI — 233, 3%) (табл. 5).

5. Прирост (%) индексов NPCI и PSRI у растений *Ocimum basilicum* разных сортов, выращиваемых на светодиодных фитостеллажах, под воздействием света разного спектрального состава и биопрепаратов БСка-3 и БиоАзФК (n = 10, УНУ НОЦ Ботанический сад НИУ БелГУ, 19 марта-29 апреля 2025 года)

| Сорт (препарат) | Спектральный состав света | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | белый | | красный | | синий | |
| | индексы оценки состояния растений | | | | | |
| | NPCI | PSRI | NPCI | PSRI | NPCI | PSRI |
| Пурпурные звезды (БСка-3) | 285,7 | 266,7 | 255,6 | 200,0 | 212,5 | 233,3 |
| Пурпурные звезды (БиоАзФК) | 176,8 | 117,2 | 100,0 | 47,3 | 108,3 | 120,0 |
| Русский гигант (БСка-3) | 66,7 | 25,0 | 100,0 | 14,3 | 214,3 | 166,7 |
| Русский гигант (БиоАзФК) | 72,5 | 53,0 | 144,4 | 50,0 | 100,0 | 25,0 |
| Бутербродный лист (БСка-3) | 73,7 | 88,9 | 76,2 | 130,0 | 88,2 | 150,0 |
| Бутербродный лист (БиоАзФК) | 74,8 | 113,7 | 60,9 | 145,4 | 48,6 | 64,4 |
| Тонус (БСка-3) | 275,0 | 400,0 | 236,4 | 375,0 | 127,3 | 60,0 |
| Тонус (БиоАзФК) | 300,0 | 400,0 | 236,4 | 375,0 | 125,0 | 100,0 |

Примечание. Состав биопрепаратов см. в разделе «Методика». Спектральный состав света см. в таблице 1. NPCI — нормализованный индекс хлорофиллов, PSRI — индекс старения листьев.

При сравнительном анализе влияния процессов обработки субстрата и спектрального состава света на растения у краснолистных сортов Пурпурные звезды и Русский гигант максимальные темпы прироста по индексам NPCI и PSRI были отмечены при обработке биопрепаратом БСка-3 в синем спектре.

Растущая коммерческая доступность светодиодов в агропромышленном производстве открывает дополнительные возможности для контроля и точного регламентирования режимов и условий выращивания растений. Важными параметрами, определяющими характер развития растений и физиологию синтеза различных метаболитов, служат характеристики спектров света, которые используются при культивировании (52-56). Несмотря на наличие ряда публикаций по влиянию условий освещения на базилик (57-59), в большинстве исследований приведены данные о реакции растений без указания сортовой принадлежности. Специфичность исследований, связанных с влиянием спектров света, связана с тем, что каждый автор использует выбранные показатели PPF или PPFD и режим освещения (60-62), что не позволяет проводить сравнительный анализ полученных данных, но в то же время расширяет представления о степени влияния света на растения и задает вектор направления исследований. Без регламентированных алгоритмов оценки влияния света на рост и развитие растений каждый исследователь самостоятельно формирует комплекс тестируемых признаков, то есть отсутствует унификация. Спектры, подобранные для одного вида или сорта оказываются неэффективными для других видов и сортов, что наглядно представлено в полученных данных при сравнении краснолистных и зеленолистных сортов базилика: реакция растений на спектры света была сортоспецифична.

Изменение в реакциях растений на свет может быть достигнуто посредством использования ростостимулирующих микроорганизмов. Свет на определенной длине волны воспринимается растениями и микроорганизмами в качестве сигнала, активирующего специфические светоиндуцированные реакции. Их запуск приводит к изменению содержания гормонов,

вторичных метаболитов, выделению летучих соединений, влияющих на взаимодействие в системе растение—микроорганизм. В свою очередь, микроорганизмы способствуют биологической доступности некоторых необходимых для растения элементов питания (N, P и K) и синтезируют регуляторы роста, которые благоприятствуют росту и развитию. То есть свет прямо или косвенно влияет на взаимодействие растений и микроорганизмов (63–65). Именно поэтому исследования совместного действия различных спектров света и микроорганизмов представляют несомненный интерес. Он обусловлен возможностью решения фундаментальных и практических задач при анализе симбиотических взаимоотношений растений и микроорганизмов. Полученные результаты позволяют массово производить качественный посадочный материал в регулируемых условиях среды и значительно повысить биологическую ценность растений без снижения биомассы.

Таким образом, воздействие излучений в трех спектральных диапазонах области ФАР и обработка биопрепаратами позволяют увеличить прирост вегетативной массы и синтез пигментов у растений *Ocimum basilicum*. Это, по-видимому, обусловлено лучшим усвоением азота и, как следствие, активным синтезом хлорофиллов. Воздействие на сорта базилика микроорганизмов и различных спектров света в ряде случаев приводило к синергетическому эффекту. Так, влияние красной части спектра на сорт Бутербродный лист способствовало увеличению цифровой биомассы (246,9 см³). Дополнительное использование микроорганизмов *Trichoderma viride* 256, *Pseudomonas koreensis* Ap33, *Bacillus subtilis* 17 (*Bacillus acidocaldarius*), *Bradyrhizobium japonicum* (*Rhizobium japonicum*) 614a в составе биопрепаратов приводило к еще большим значениям цифровой биомассы растений (327,8 см³). Для сортов с пурпурной окраской (Пурпурные звезды и Русский гигант) оптимальным оказалось воздействие света с преобладанием синей части спектра. Зеленолистные сорта базилика лучше реагировали на освещение с доминированием красной и белой частей спектра. Использование волн синей части спектра приводило к замедлению развития цифровой биомассы и к снижению фотосинтетической активности растений даже при обработке субстрата микроорганизмами. Результаты дисперсионного анализа указывают на существенные различия в реакциях сортов базилика на условия освещения и воздействие комплексов микроорганизмов, то есть на сортоспецифичность. В связи с этим для разработки режимов управления ростом и развитием растений необходимо создание специальных протоколов, характеризующих оптимальные условия роста и развития конкретного сорта. Применение комплексов микроорганизмов при обработке субстратов позволяет полнее раскрыть потенциал сортов в контролируемых условиях закрытого грунта. Полученные в наших экспериментах данные могут применяться при производстве микрозелени *O. basilicum* в закрытом грунте, при контролируемых условиях среды и регулируемых параметрах освещения. Использование технологий машинного зрения с применением 3D мультиспектрального лазерного сканера для оценки влияния света различного спектрального состава и процессов биотизации на морфофизиологические параметры роста у сортов *O. basilicum* расширяет возможности изучения ответных микрореакций растений и позволяет ускорить оценку, получая при этом более информативные и объективные результаты.

Авторы благодарят анонимных рецензентов за ценные замечания к первым вариантам статьи, что позволило существенно улучшить качество представленных в

ней данных.

¹Научно-образовательный центр Ботанический сад
НИУ БелГУ,
308015 Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85,
e-mail: info@bsuedu.ru ✉, tokhtar@bsuedu.ru, tretyakovmiy@gmail.com;
²Группа компаний «ЭФКО»,
309850 Россия, Белгородская обл., г. Алексеевка, ул. Фрунзе, 2,
e-mail: zhuravla@yandex.ru;
³ФГБНУ Федеральный научный агроинженерный центр
ВИМ,
109428 Россия, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5,
e-mail: vim@vim.ru

Поступила в редакцию
11 октября 2025 года
Принята к публикации
3 декабря 2025

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2026, V. 61, № 1, pp. 156-171

ASSESSING A COMPREHENSIVE IMPACT OF VARIOUS LIGHT SPECTRA AND MICROORGANISMS ON GROWTH AND DEVELOPMENT OF *Ocimum basilicum* L. VARIETIES

V.K. Tokhtar¹ ✉, M.Y. Tretyakov¹, L.A. Tokhtar¹, E.V. Zhuravleva², A.V. Sibirev³,
D.V. Biryukov¹, V.A. Chernykh¹

¹Botanical Garden of Belgorod State National Research University, 85, ul. Pobedy, Belgorod, 308015 Russia, e-mail info@bsuedu.ru (✉ corresponding author), tokhtar@bsuedu.ru, tretyakovmiy@gmail.com;

²EFKO Companies, 2, ul. Frunze, Alekseevka, Belgorod Province, 309850 Russia, e-mail zhuravla@yandex.ru;

³Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1 Institutskii proezd, Moscow, 109428 Russia, e-mail vim@vim.ru
ORCID:

Tokhtar V.K. orcid.org/0000-0002-7417-4893

Tretyakov M.Y. orcid.org/0000-0001-6789-8060

Tokhtar L.A. orcid.org/0000-0001-5152-3731

Zhuravleva E.V. orcid.org/0000-0002-3253-0730

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

The authors would like to thank the anonymous reviewers for their valuable comments on the first versions of the article, which significantly improved the quality of the data presented in it.

Funded by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for large scientific projects in the priority areas of scientific and technological development (project No. 075-15-2024-540)

Final revision received October 11, 2025

doi: 10.15389/agrobiology.2026.1.156eng

Accepted December 03, 2025

Abstract

Cultivation of microgreens in closed facilities is promising due to profitability for the manufacturer and satisfies the year-round urban demand for products. The developed technologies for growing plants in greenhouses largely involve the use of light-emitting diodes (LEDs). It is shown that changes in the light spectral composition pose different effects on plant growth and development, and thereby on photosynthetic processes and productivity in vivo and in vitro. Importantly, in terms of plant growth parameters, the effect of bacterial strains together with light of various spectral compositions has practically not been considered. The development of lighting technology to a better use of controlled spectra necessitates an accurate understanding of how changes in the spectral composition of light can affect the growth, development and biochemistry of plants, in particular, aromatic crops the cultivation of which has great potential. A key problem in assessing the combined effect of light and microorganisms on plants remains how to accurately record morphophysiological changes in plants. Modern noninvasive tools provide assessment of plant phenotype parameters under controlled environment resulting in rapid accumulation of a big set of experimental data. This paper is the first to reveal the influence of growth promoting and symbiotic microorganisms combined with various light spectra on the growth and development of sweet basil varieties. Our aim was a comprehensive assessing the effect of light spectral composition and biotization processes on the morphophysiological parameters of *Ocimum basilicum* varieties in the LED culture. The work was carried out at the BelSU Botanical Garden during March 19-April 29, 2025. We compared four *O. basilicum* varieties from two groups differing in leaf color, the purple-leaved Purpurnye Zvezdy, Russki Gigant and the green-leaved Buterbrodnyi List, Tonus. The seeds were sown in 0.5 l plastic pots P9. To assess the effect of microorganisms, microbiological preparations BSkA-3 (Biotechagro LLC, Russia) and BioAzFC (NVP BashInkom LLC, Russia) were used. The plants were cultivated on the X-bright Fito Spectr V1.0 phytostellages (BelSU Electronic Systems LLC, Russia) equipped with LED lighting sources and the ability to adjust the spectral composition and intensity of radiation. The spectral

composition of the light was evaluated using an UPRtek MK 350D spectrometer (UPRtek, Taiwan). The experiment examined the plant responses to exposure to lighting combinations in three spectral ranges of photosynthetically active radiation (HEADLIGHTS) (blue, green, red) and the combined effect of microbiological preparations and lighting modes. A 3D multispectral laser scanner PlantEye F500 ("Phenospec", the Netherlands) was used to evaluate the morphophysiological characteristics of plants. The experimental data obtained indicated an increase in the digital biomass of plants, the normalized chlorophyll index (NPCI), the leaf aging index (PCRI) and their hue in four basil varieties when exposed to the studied factors. It has been established that the use of microorganisms can reduce the rate of recruitment of vegetative mass of plants, but at the same time there is an increase in the activity of pigment synthesis. Exposure of basil plants to different light spectra and microorganisms in some cases led to a synergistic effect on plant growth and development. Differences in the reaction of purple-leaved and green-leaved varieties to the effects of different spectral compositions of light have been established. The optimal spectral composition of light has been identified for varieties with green leaves (PPFD 405.2; PPFD-B 2.5; PPFD-G 2.3; PPFD-R 400.4), which contribute to the growth of digital biomass values. The increase in pigment content in green leaf varieties was achieved by using the following spectral light composition: PPFD 400: PPFD-B 94.1; PPFD-G 202.1; PPFD-R 103.9. In red-leaved basil varieties, biomass gain was more intensive when using blue light, 211.2 cm³ for the Ppurpurnye Zveady, and white spectral light composition, 307.0 cm³ for the Russkii Gigant variety. Our findings can be practiced to increase the biomass of microgreens and reduce the cost of greenhouse-grown plants.

Keywords: *Ocimum basilicum*, spectral composition of light, microorganisms, morphophysiological parameters, non-invasive assessment.

REFERENCES

1. Gunjal M., Singh J., Kaur J., Kaur S., Nanda V., Sharma A., Rasane P. Microgreens: cultivation practices, bioactive potential, health benefits, and opportunities for its utilization as value-added food. *Food Bioscience*, 2024, 62: 105133 (doi: 10.1016/j.fbio.2024.105133).
2. Singh A., Singh J., Kaur S., Gunjal M., Kaur J., Nanda V., Ullah R., Ercisli S., Rasane P. Emergence of microgreens as a valuable food, current understanding of their market and consumer perception: a review. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101527 (doi: 10.1016/j.fochx.2024.101527).
3. Es'kov I.D., Zemskova Yu.K., Lyalina E.V., Suminova N.B., Kritskaya E.E. *Agrarniy nauchniy zhurnal*, 2020, 10: 19-23 (doi: 10.28983/asj.y2020i10pp19-23) (in Russ.).
4. Prikupets L.B., Boos G.V., Terekhov V.G., Tarakanov I.G. *Svetotekhnika*, 2019, 4: 6-13 (in Russ.).
5. Anishchenko I.E., Zhigunov O.Yu. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2023, 1: 20-26 (doi: 10.26897/0021-342X-2023-1-20-26) (in Russ.).
6. Kurina A.B. *Ovoshchi Rossii*, 2022, 6: 17-23 (doi: 10.18619/2072-9146-2022-6-17-23) (in Russ.).
7. Othman A.J., Vodrezova E.S., Mardini M., Hanana M.B. Dataset for the content of bioactive components and phytonutrients of (*Ocimum basilicum* and *Brassica rapa*) microgreens. *Data in Brief*, 2022, 40: 107737 (doi: 10.1016/j.dib.2021.107737).
8. Kordi S., Salmasi S.Z., Kolvanagh J.S., Weisany W., Shannon D.A. Intercropping system and N₂ fixing bacteria can increase land use efficiency and improve the essential oil quantity and quality of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Front. Plant Sci.*, 2020, 11: 610026 (doi: 10.3389/fpls.2020.610026).
9. Kaur P., Verma K., Kumar Singh A., Kumar R., Singh S. Co-cultivation of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) with food crops for efficient resource utilization and increasing the farm profits. *Industrial Crops and Products*, 2024, 214: 118495 (doi: 10.1016/j.indcrop.2024.118495).
10. Caracciolo F., El-Nakhel C., Raimondo M., Kyriacou M. C., Cembalo L., De Pascale S., Roupheal Y. Sensory attributes and consumer acceptability of 12 microgreens species. *Agronomy*, 2020, 10(7): 1043 (doi: 10.3390/agronomy10071043).
11. Sinyavina N.G., Panova G.G., Kuleshova T.E., Chesnokov Yu.V. Artificial light culture of plants in modern artificial climate facilities (review). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2024, 59 (5): 869-892 (doi: 10.15389/agrobiology.2024.5.869rus).
12. Beacham A.M., Vickers L.H., Monaghan J.M. Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2019, 94(3): 277-283 (doi: 10.1080/14620316.2019.1574214).
13. Molina A., Sánchez López A. M., Martínez Jiménez E., Barcenás Cortés A.L., Ponce P. Creation of Parcelas 5.0 using the 5S framework (social, sustainable, smart, sensing and safe) to improve traditional farming in Mexico. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2025, 18(1): 2471306 (doi: 10.1080/19397038.2025.2471306).
14. Oh S., Lu C. Vertical farming — smart urban agriculture for enhancing resilience and sustainability in food security. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2022, 98(2): 133-

- 140 (doi: 10.1080/14620316.2022.2141666).
15. Tan A.L., Ng Y.S., Koh J., Ong Y.S., Koh D. Applying concepts of plant nutrition in the real-world: designing vertical farming systems. *Science Activities*, 2022, 60(1): 5-31 (doi: 10.1080/00368121.2022.2138249).
 16. Sipos L., Balázs L., Székely G., Jung A., Sárosi S., Radácsi P., Csambalik L. Optimization of basil (*Ocimum basilicum* L.) production in LED light environments — a review. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 110486 (doi: 10.1016/j.scienta.2021.110486).
 17. Boos G.V., Prikupets L.B., Trukhachëv V.I., Tarakanov I.G., Terekhov V.G. *Vestnik rossiyaskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 2022, 5: 36-41 (doi: 10.31857/2500-2082/2022/5/36-41) (in Russ.).
 18. Martirosyan L.Yu., Kosobryukhov A.A., Martirosyan V.V., Martirosyan Yu.Ts. The influence of different light sources on photosynthetic performance and productivity of *Cucumis sativus* L. hybrid Tristan F₁ in aeroponic phytotron facilities. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2021, 56(5): 934-947 (doi: 10.15389/agrobiol.2021.5.934rus).
 19. Muratova S.A., Budagovskiy A.V., Tokhtar L.A., Tokhtar V.K., Deineka L.A. The research of clonal micropropagation efficiency of *Schisandra chinensis* under the influence of low-intensity coherent radiation. *International Journal of Green Pharmacy*, 2017, 11(3): 634 (doi: 10.22377/ijgp.v11i03.1187).
 20. Muratova S.A., Subbotina N.S., Tokhtar L.A., Tokhtar V.K., Yatsenko V.M., Petrunova T.V. The influence of the spectral composition on the root development of ornamental plants in vitro. *Indo American Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2018, 05(07): 6979-6984 (doi: 10.5281/zenodo.1324380).
 21. Kurina A.B., Zheleznova K.O., Solovieva A.E., Sinyavina N.G., Panova G.G., Artemyeva A.M. Morphological and biochemical 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/agrobiol.2023.5.889rus).
 22. Sena S., Kumari S., Kumar V., Husen A. Light emitting diode (LED) lights for the improvement of plant performance and production: a comprehensive review. *Current Research in Biotechnology*, 2024, 7: 100184 (doi: 10.1016/j.crbiot.2024.100184).
 23. Vodnik D., Vogrin Ž., Šircelj H., Grohar M.C., Medič A., Carović-Stanko K., Safner T., Lazarević B. Phenotyping of basil (*Ocimum basilicum* L.) illuminated with UV-A light of different wavelengths and intensities. *Scientia Horticulturae*, 2023, 309: 111638 (doi: 10.1016/j.scienta.2022.111638).
 24. Dörr O.S., Brezina S., Rauhut D., Mibus H. Plant architecture and phytochemical composition of basil (*Ocimum basilicum* L.) under the influence of light from microwave plasma and high-pressure sodium lamps. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2020, 202: 111678 (doi: 10.1016/j.jphotobiol.2019.111678).
 25. Olonin I.Yu. *AgroEkoInzheneriya*, 2025, 1(122): 134-145 (doi: 10.24412/2713-2641-2025-1122-134-144) (in Russ.).
 26. Ivanitskikh A.S., Tarakanov I.G. *Voprosi biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii*, 2022, 25(11): 3-9 (doi: 10.29296/25877313-2022-11-01) (in Russ.).
 27. Sivasakthivelan P., Saranraj P. Azospirillum and its formulations: a review. *International Journal of Microbiological Research*, 2013, 4: 275-287.
 28. Sumbul A., Ansari RA., Rizvi R., Mahmood I. Azotobacter: a potential bio-fertilizer for soil and plant health management. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2020, 27(12): 3634-3640 (doi: 10.1016/j.sjbs.2020.08.004).
 29. Dória J., Molina Y.C., Gómez Sepúlveda A.M., Rodrigues F.A., Pasqual M., da Conceição Jesus E. Chapter 22 — In vitro “biotization” of plant tissue cultures and application of microbial inoculants In: *Plant and soil microbiome, microbial inoculants*. A. Kumar, J. Singh, A.M. Queijeiro López, R.N. Kharwar (eds.). Academic Press, 2025: 433-448 (doi: 10.1016/B978-0-443-23560-3.00023-1).
 30. Adesemoye A.O., Obini M., Ugoji E.O. Comparison of plant growth-promotion with *Pseudomonas aeruginosa* and *Bacillus subtilis* in three vegetables. *Braz. J. Microbiol.*, 2008, 39(3): 423-426 (doi: 10.1590/S1517-83822008000300003).
 31. Saini S., Lohani S., Khatri P., Rani V. Chapter 12 — PGPR-mediated mitigation of biotic and abiotic stress in plants. In: *Developments in applied microbiology and biotechnology. Advanced Microbial Technology for Sustainable Agriculture and Environment*. S. Gangola, S. Kumar, S. Joshi, P. Bhatt (eds.). Academic Press, 2023: 199-227 (doi: 10.1016/B978-0-323-95090-9.00013-3).
 32. Petrova Y.D., Zhao J., Webster G., Mullins A.J., Williams K., Alswat A.S., Challis G.L., Bailey A.M., Mahenthiralingam E. Cloning and expression of Burkholderia polyene biosynthetic gene clusters in *Paraburkholderia* hosts provides a strategy for biopesticide development. *Microbial Biotechnology*, 2022, 15(10): 2547-2561 (doi: 10.1111/1751-7915.14106).
 33. Yang Y.-S., Wada K., Goto M., Futsuhara Y. In vitro formation of nodular calli in soybean (*Glycine max* L.) induced by co-cultivated *Pseudomonas maltophilia*. *Japanese Journal of Breeding*, 1991, 41(4): 5954504 (doi: 10.1270/jsbbs1951.41.595).
 34. Castro Molina Y., Dória J., Gómez Sepúlveda A.M., Carvalho, L.Q., Pasqual M., da Conceição

- Jesus E. Biotization with plant growth promoting bacteria benefits the survival and production of potato (*Solanum tuberosum* L.) in vitro and in vivo. *Horticulturae*, 2025, 11(4): 393 (doi: 10.3390/horticulturae11040393).
35. Gopalakrishnan S., Srinivas V., Prasanna S.L. Chapter 5 — Streptomyces. In: *Beneficial microbes in agro-ecology*. N. Amaresan, M.S. Kumar, K. Annapurna, K. Kumar, A. Sankaranarayana (eds.). Academic Press, 2020: 55-71 (doi: 10.1016/B978-0-12-823414-3.00005-8).
 36. Subramaniam G., Thakur V., Saxena R.K., Vadlamudi S., Purohit S., Kumar V., Rathore A., Chitkineni A., Varshney R.K.. Complete genome sequence of sixteen plant growth promoting *Streptomyces* strains. *Sci. Rep.*, 2020, 10: 10294 (doi: 10.1038/s41598-020-67153-9).
 37. Verma M., Mishra J., Arora N.K. Plant growth-promoting rhizobacteria: diversity and applications. In: *Environmental biotechnology: for sustainable future*. Springer, Singapore, 2018: 129-173 (doi: 10.1007/978-981-10-7284-0_6).
 38. Soumare A., Diédhiou A.G., Arora N.K., Tawfeeq Al-Ani L.K., Ngom M., Fall S., Hafidi M., Ouhdouch Y., Kouisni L., Sy M.O. Potential role and utilization of plant growth promoting microbes in plant tissue culture. *Front. Microbiol.*, 2021, 12: 649878 (doi: 10.3389/fmicb.2021.649878).
 39. Castro-Restrepo D., Dominguez M.I., Gaviria-Gutiérrez B., Osorio E., Sierra K. Biotization of endophytes *Trichoderma asperellum* and *Bacillus subtilis* in mentha spicata microplants to promote growth, pathogen tolerance and specialized plant metabolites. *Plants*, 2022, 11(11): 1474 (doi: 10.3390/plants11111474).
 40. Vij S., Sharma N., Sharma M., Mohanta T.K., Kaushik P. Application of *Trichoderma viride* and *Pseudomonas fluorescens* to cabbage (*Brassica oleracea* L.) improves both its seedling quality and field performance. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7583 (doi: 10.3390/su14137583).
 41. Tretyakov M.Yu., Tokhtar V.K., Zhuravleva E.V., Biryukov D.V. Accuracy assessment of *Syringa vulgaris* L. morphological signs phenotyping with a laser 3D scanner PlantEye F500 depending on plant location on the scanned surface. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2022, 57(5): 921-932 (doi: 10.15389/agrobiol.2022.5.921rus).
 42. Majer P., Sass L., Horváth G.V., Hídeg É. Leaf hue measurements offer a fast, high-throughput initial screening of photosynthesis in leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(1): 74-76 (doi: 10.1016/j.jplph.2009.06.015).
 43. Pecuelas J., Gamon J.A., Fredeen A.L., Merino J., Field C.B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 135-146 (doi: 10.1016/0034-4257(94)90136-8).
 44. Ren S., Chen X., An S. Assessing plant senescence reflectance index-retrieved vegetation phenology and its spatiotemporal response to climate change in the Inner Mongolian Grassland. *Int. J. Biometeorol.*, 2017, 61: 601-612 (doi: 10.1007/s00484-016-1236-6).
 45. Zhu X., Wu C., Hui J. Effect of light intensity on anthocyanin synthesis assessed using leaves of *Aglaonema commutatum*. *Genes*, 2025, 16(4): 375 (doi: 10.3390/genes16040375).
 46. Palma C.F.F., Castro-Alves V., Morales L.O., Rosenqvist E., Ottosen C.O., Strid E. Spectral composition of light affects sensitivity to UV-B and photoinhibition in cucumber. *Front. Plant Sci.*, 2021, 11: 610011 (doi: 10.3389/fpls.2020.610011).
 47. Liu Y., Schouten R.E., Tikunov Y., Liu X., Visser R.G.F., Tan F., Bovy A., Marcelis L.F.M. Blue light increases anthocyanin content and delays fruit ripening in purple pepper fruit. *Post-harvest Biology and Technology*, 2022, 192: 112024 (doi: 10.1016/j.postharvbio.2022.112024).
 48. Yaoyuan Z., Lau N.S., Subramaniam S. Illuminating the harvest: the regulatory effects of LEDs on pigment accumulation in various food crops. *Physiol. Mol. Biol. Plants*, 2025, 31: 693-708 (doi: 10.1007/s12298-025-01596-0).
 49. Tokhtar V.K., Tretyakov M.Yu., Zelenkova V.N., Nikulin I.S., Batishchev O.V. Features of phytoextraction of rare earth elements by a complex of plants and microorganisms from technogenically polluted wastewater of mining enterprises. *E3S Web of Conferences*, 2023, 463: 02010 (doi: 10.1051/e3sconf/202346302010).
 50. Tokhtar V.K., Tretyakov M.Yu., Zelenkova V.N., Biryukov D.V. Evaluation of the impact of technogenically polluted wastewater on the morphological and physiological parameters of phytoremediants in combination with various types of microorganisms. *E3S Web of Conferences*, 2023, 411: 02015 (doi: 10.1051/e3sconf/202341102015).
 51. Pavlyusin V.A., Novikova I.I., Boikova I.V. Microbiological control in phytosanitary optimization technologies for agroecosystems: research and practice (review). *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2020, 55(3): 421-438 (doi: 10.15389/agrobiol.2020.3.421rus).
 52. Tymoszyk A., Kulus D., Kowalska J., Kulpínska A., Pańka D., Jeske M., Antkowiak M. Light spectrum affects growth, metabolite profile, and resistance against fungal phytopathogens of *Solanum lycopersicum* L. seedlings. *Journal of Plant Protection Research*, 2024, 64 (2): 115-126 (doi: 10.24425/jppr.2024.150247).
 53. Martirosyan Yu.Ts., Martirosyan L.Yu., Kosobryukhov A.A. Dynamic regulation of photosynthetic processes under variable spectral led irradiation of plants. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2019, 54 (1): 130-139 (doi: 10.15389/agrobiol.2019.1.130rus).
 54. Lauria G., Ceccanti C., Lo Piccolo E., El Horri H., Guidi L., Lawson T., Landi M. "Metabolight": how light spectra shape plant growth, development and metabolism. *Physiologia*

- Plantarum*, 2024 176(6): e14587 (doi: 10.1111/ppl.14587).
55. Seyedi F.S., Nafchi M.G., Reezi S. Effects of light spectra on morphological characteristics, primary and specialized metabolites of *Thymus vulgaris* L. *Heliyon*, 2024, 10(1): e23032 (doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23032).
 56. Wu W., Chen L., Liang R., Huang S., Li X., Huang B., Luo H., Zhang M., Wang X., Zhu H. The role of light in regulating plant growth, development and sugar metabolism: a review. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15 (doi: 10.3389/fpls.2024.1507628).
 57. d'Aquino L., Cozzolino R., Nardone G., Borelli G., Gambale E., Sighicelli M., Menegoni P., Modarelli G.C., Rimauro J., Chianese E., Nenna G., Fasolino T., D'Urso G., Montoro P. Effects of white and blue-red light on growth and metabolism of basil grown under microcosm conditions. *Plants*, 2023, 12(7): 1450 (doi: 10.3390/plants12071450).
 58. Kondratieva V.V., Voronkova T.V., Semenova M.V., Olekhovich L.S., Shelepova O.V. Effect of LEDs on the growth and physiological responses of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1045: 012090 (doi: 10.1088/1755-1315/1045/1/012090).
 59. Prikupets L.B., Boos G.V., Terekhov V.G., Tarakanov I.G. *Svetotekhnika*, 2018, 5: 6-12 (in Russ.).
 60. Pennisi G., Blasioli S., Cellini A., Maia L., Crepaldi A., Braschi I., Spinelli F., Nicola S., Fernandez J.A., Stanghellini C., Marcellis L.F.M., Orsini F., Gianquinto G. Unraveling the role of red:blue LED lights on resource use efficiency and nutritional properties of indoor grown sweet basil. *Front Plant Sci*, 2019, 13(10): 305 (doi: 10.3389/fpls.2019.00305).
 61. Rahman M.M., Vasiliev M., Alameh K. LED illumination spectrum manipulation for increasing the yield of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plants (Basel)*, 2021, 10(2): 344 (doi: 10.3390/plants10020344).
 62. Solbach J.A., Fricke A., Stützel H. Seasonal efficiency of supplemental LED lighting on growth and photomorphogenesis of sweet basil. *Front. Plant Sci.*, 2021, 6(12): 609975 (doi: 10.3389/fpls.2021.609975).
 63. Carvalho S.D., Castillo J.A. Influence of light on plant-phylosphere interaction. *Front. Plant Sci.*, 2018, 9: 1482 (doi: 10.3389/fpls.2018.01482).
 64. Vitale L., Vitale E., Francesca S., Lorenz C., Arena C. Plant-growth promoting microbes change the photosynthetic response to light quality in spinach. *Plants*, 2023, 12(5): 1149 (doi: 10.3390/plants12051149).
 65. Jeffery S., Harris J.A., Rickson R.J., Ritz K. The spectral quality of light influences the temporal development of the microbial phenotype at the arable soil surface. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 553-560 (doi: 10.1016/j.soilbio.2008.12.014).