

УДК 581.1, 57.043, 635.15

## ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТОВОЙ СРЕДЫ НА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЕ, ЭЛЕКТРО- И МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕДИСА В УСЛОВИЯХ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

© 2024 г. Т. Э. Кулешова<sup>a,\*</sup>, П. В. Желначева<sup>a</sup>, Е. М. Эзерина<sup>a</sup>, В. Е. Вертебный<sup>a</sup>,  
Ю. В. Хомяков<sup>a</sup>, Г. Г. Панова<sup>a</sup>, А. А. Кочетова<sup>a</sup>, Н. Г. Синявина<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: [www.piter.ru@bk.ru](mailto:www.piter.ru@bk.ru)

Поступила в редакцию 21.08.2023 г.

После доработки 15.10.2023 г.

Принята к публикации 02.11.2023 г.

В работе рассмотрены особенности влияния источников света, имитирующих солнечное освещение с различным спектральным составом с соотношением синего : зеленого : красного диапазонов 11% : 35% : 54% (AFI-3000), 19% : 38% : 43% (AFI-4000) и 25% : 38% : 37% (AFI-5000), на морфометрические, биохимические, фотосинтетические и электрогенные параметры редиса (*Raphanus sativus* L.) для светокультуры сорта Петербургский фиолетовый. Проведенные исследования выявили достоверное увеличение урожая корнеплодов (3.45 кг/м<sup>2</sup> за 28 суток вегетации), содержания сухого вещества до 8.9% и фотосинтетических пигментов, уменьшение количества нитратов до 1206 мг/кг у растений редиса, освещаемых светильниками AFI-5000 со спектром, близким к солнечному излучению в полдень. В данном варианте наблюдали повышение коэффициентов эффективного квантового фотохимического выхода фотосистемы ФС II Y (II) = 0.206, фотохимического qP = 0.304 и нефотохимического qN = 0.415 тушения флуоресценции, а также высокую генерацию разности потенциалов до 532 мВ в корнеобитаемой среде по сравнению с AFI-3000, моделирующим свет солнца у горизонта, при освещении которым наблюдалась высокая доля рассеяния света листом (R800 = 1.716), и AFI-4000 со спектром, приближенным к утреннему свету. Вариант AFI-4000 показал наихудший результат — повышенные нерегулируемые потери энергии возбуждения Y(NO) = 0.712 и пропускание света листовой поверхностью 7.5%. Применение источника света AFI-5000 способствовало получению более высоких показателей, характеризующих как выход растительной продукции, так и активность фотосинтетического аппарата и интенсивность электрогенных процессов в корнеобитаемой среде, что позволяет рекомендовать светильник данного типа для выращивания корнеплодных культур в условиях светокультуры. Вероятно, этот положительный эффект связан с наличием в спектре большей доли синего света, влияющего на развитие корневой системы.

**Ключевые слова:** *Raphanus sativus*, биохимический состав, корнеобитаемая среда, разность потенциалов, световая среда, светодиодные светильники, спектры отражения, продуктивность, флуоресценция

DOI: 10.31857/S0015330324020105, EDN: OAORNF

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в мире наблюдается значительный рост производства растительной продукции в контролируемых условиях среды с использованием искусственно создаваемого освещения [1]. В настоящее время автоматизи-

рованные растительные фабрики (ситифермы, вертикальные фермы, фитотехкомплексы и др.) различного масштаба используют для производства растительной продукции в большинстве стран Азии, Америки, Австралии и Европы [2–4]. Производство в сооружениях искусственного климата постоянно развивается и совершенствуется как в области технологий выращивания, так и в плане ассортимента растительных культур [3, 5]. При выращивании растений в условиях светокультуры одним из ключевых факторов получе-

**Сокращения:** ДНаТ — дуговые натриевые трубчатые лампы; ДНаЗ — дуговые натриевые зеркализированные лампы; е.в. — естественная влажность; с.в. — сухое вещество; ФАР — фотосинтетически активная радиация; ФС II — фотосистема II.

ния высоких урожаев является правильный подбор скороспелых образцов, ценных по комплексу биохимических, физиологических и хозяйственных признаков. В настоящее время в сооружениях искусственного климата наиболее значительную часть производимой продукции составляют листостебельные овощные культуры, прежде всего компактные и быстрорастущие представители семейств Asteraceae и Brassicaceae, что объясняется более высокой рентабельностью их производства в этих условиях [6, 7]. Редис (*Raphanus sativus* L.) относится к капустным культурам (сем. Brassicaceae) и, благодаря компактным размерам, скороспелости (до 12 вегетаций в год) и ценному биохимическому составу, является перспективной культурой для современных растительных фабрик, оборудованных многоуровневыми системами выращивания. Использование высокопродуктивных образцов с малоопушенным типом листа может повысить рентабельность возделывания культуры за счет того, что они практически целиком могут быть использованы в пищу, что является важным требованием, предъявляемым к растениям, предназначенным для коммерческого производства в сооружениях искусственного климата. Однако развитие растений контролируется не только генетически заложенными признаками, но и определяется параметрами окружающей среды. Регулируемые условия выращивания существенно ускоряют процесс отбора и выведения новых сортов и гибридов различных культур; их применение позволяет максимально точно оценить влияние генотипа и моделируемых факторов на фенотипическое проявление хозяйственно ценных признаков, таких как урожай и его структура, товарные качества растительной продукции, ее биохимический состав, устойчивость растений к действию неблагоприятных стрессовых условий [8, 9].

Световая среда — поле оптического излучения в занятой растениями части пространства, определяемое естественным или искусственным освещением в культивационном помещении и фитоценозом [10], является одним из важнейших факторов, влияющих как на работу фотосинтетического аппарата, так и на продуктивность, качество и физиологические параметры растений в целом. При правильном выборе условий освещения — интенсивности, спектрального состава, длительности и пространственного распределения — можно контролировать рост растений и регулировать биохимический состав, что является перспективной экологически безопасной альтернативной химическим регуляторам роста [11, 12].

На данный момент накоплено множество экспериментальных данных по влиянию искусственно создаваемых условий световой среды на физиологические параметры растений [13–16].

Тем не менее, вопросы оптимизации продукционного процесса и снижения себестоимости растительной продукции в светокультуре еще не решены окончательно, и ключевое значение для дальнейшего развития производства в условиях защищенного грунта принадлежит разработке и внедрению источников света, эффективных как с точки зрения получения высококачественной растительной продукции, так и экономически выгодных [2]. Нерешенной проблемой остается согласование, с одной стороны, энерго- и ресурсосберегающих технологий освещения, а с другой — нормативных биохимических показателей и вкусовых качеств растительных культур, которые в полной мере зависят от количественных и спектральных характеристик излучения. Исследования последних лет показывают, что растениям для реализации продукционного потенциала необходим полный спектр излучения, приближенный к естественному освещению в видимой области [17, 18], поскольку солнечный спектр содержит в себе все функциональные длины волны 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 [19].

Солнечный свет может быть использован напрямую с применением прозрачных одноярусных теплиц или передан через оптоволоконно с помощью концентратора на основе линзы Френеля с коэффициентом эффективности 0.28–0.40 [20]. Оба эти пути зависят от времени и погоды. Другой подход — это моделирование естественного излучения с помощью искусственного освещения [21].

В настоящее время можно выделить три типа источников света, которые применяются для выращивания растений — дуговые натриевые трубчатые (ДНАТ) и зеркализированные (ДНАЗ) лампы высокого давления, люминесцентные лампы и светодиоды, имеющие высокую перспективу для применения в растениеводстве [4]. Натриевые лампы высокого давления обладают высокой световой отдачей (до 160 лм/Вт) и наиболее распространены в растениеводстве защищенного грунта, однако им свойственно высокое тепловое излучение и низкое качество спектральной эмиссии в синей области. Спектр люминесцентных ламп близок к естественному солнечному свету и они могут быть использованы в многоярусных установках в непосредственной близости к растительному покрову, так как не сильно нагреваются при работе, однако данные источники света обладают низкой световой отдачей (50–70 лм/Вт) и маленьким сроком службы (около 10 000 ч). Светодиодные светильники стремительно завоевывают рынок

и становятся популярными системами освещения в тепличных хозяйствах и ситифермах [22]. Они зарекомендовали себя как наиболее энергоэффективные источники света. Немаловажной особенностью светодиодного освещения является равномерный поток излучения по всей облучаемой поверхности, возможность создавать практически любой спектр в видимой области и устанавливать источники света в непосредственной близости от растения из-за низкой температуры нагрева светильников во время работы.

Развитие светодиодных технологий позволило смоделировать естественное освещение с помощью нанесения люминофоров различного состава на белые [23] и ультрафиолетовые светодиоды [21]. С использованием спектра излучения, приближенного к солнечному свету, для растений салата была получена большая площадь листа и, соответственно, фотоассимилирующей поверхности, в результате чего наблюдался прирост биомассы по сравнению с освещением белыми светодиодами [24]. Для растений редиса показано, что повышения его продуктивности можно добиться с использованием полноспектрального излучения в области ФАР, особенно на ранних этапах развития [25].

Таким образом, все чаще при производстве культурных растений используют источники света, формирующие электромагнитные волны с диапазонами, соответствующими не только пикам поглощения хлорофиллов в красной и синей частях спектра, а всей области ФАР [24, 26], роль и механизм влияния которой на различные растительные культуры еще предстоит выяснить.

Цель работы — изучение особенностей влияния полноспектрального состава фотосинтетически активной радиации на морфологические и биохимические параметры и показатели развития редиса для оптимизации его культивирования в сооружениях искусственного климата.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Объект исследования и условия выращивания.** В ФГБНУ АФИ с использованием методологии ускоренного получения трансгрессий по хозяйственно ценным признакам растений [27] был создан сорт редиса Петербургский фиолетовый для светокультуры, с салатным типом листа [28], выбранный в качестве объекта исследования. Данный сорт характеризуется скороспелостью, компактной листовой розеткой и устойчивостью к загущенному посеву.

Исследования проводили на биополигоне ФГБНУ АФИ с регулируемыми условиями микроклимата [29]. Редис высевали сухими семенами в пластиковые кассеты для рассады размером  $53 \times 32 \times 6$  см. Густота стояния составляла 160 растений/м<sup>2</sup>. В качестве корнеобитае-

мой среды использовали торфяной грунт (Агробалт С, ООО “Пиндstrup”, Россия) на основе верхового торфа низкой степени разложения, содержащий не менее: N — 150 мг/л, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 150 мг/л, K<sub>2</sub>O — 250 мг/л, Mg — 30 мг/л, Ca — 120 мг/л. Температура воздуха поддерживалась в пределах +20...+22°C днем и +18...+20°C ночью, относительная влажность воздуха — 65–70%. Полив осуществляли водой, чередуя с подкормками раствором Кнопа (три раза в неделю), влажность субстрата поддерживали на уровне  $65 \pm 5\%$  от полной влагоемкости.

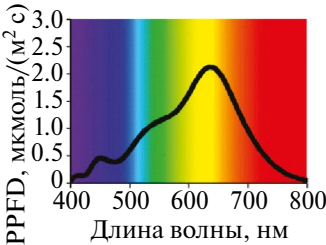
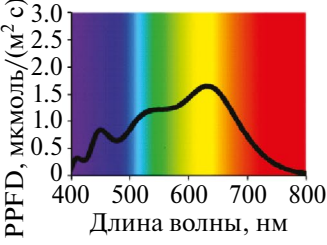
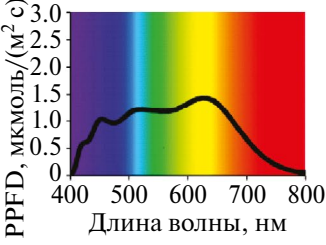
**Источники света.** Для исследования роли состава световой среды с различной интенсивностью излучения в значимых областях ФАР были выбраны три различных спектра излучения, моделирующих естественное освещение в разное время суток [30] и реализованных нами в следующих источниках света: 1) AFI-3000 — светодиодные светильники с цветовой температурой 3000 К со спектральным составом в видимой области, приближенным к естественному свету, когда солнце находится у горизонта; 2) AFI-4000 — светодиодные светильники с цветовой температурой 4000 К с наиболее нейтральным освещением, приближенным к утреннему и послеобеденному свету; 3) AFI-5000 — светодиодные светильники с цветовой температурой 5000 К со спектром, близким к солнечному свету в полдень (табл. 1). Светильники созданы на базе светодиодов нового поколения, излучающих фиолетовый свет и покрытых трехкомпонентным люминофором, преобразующим его в полноспектральный с полноценной красной, зеленой и синей составляющими. Величина плотности фотосинтетического потока фотонов PPFD была для всех вариантов одинаковой и составляла порядка  $320 \pm 20$  мкмоль/(м<sup>2</sup>·с). Продолжительность светового периода составляла 14 ч/сут. Следует отметить, что источник света AFI-5000 характеризовался наличием наибольшей доли синего света в спектре — соотношение синего (400–500 нм) к зеленому (500–600 нм) и к красному (600–700 нм) диапазонам для него составило 1 : 1.5 : 1.5, для AFI-4000 — 1 : 2 : 2.3, для AFI-3000 — 1 : 3.3 : 5.2.

**Морфометрические показатели.** Уборку растений осуществляли на 28 сут от посева семян. При уборке учитывали массу листьев и корнеплодов, размер листовой розетки и корнеплодов, процент товарных корнеплодов. К товарным относили корнеплоды массой выше 8 г, без дефектов. На основании полученных данных рассчитывали следующие индексы:

— индекс хозяйственной эффективности, определяемый как отношение массы корнеплода к общей массе растения;

— индекс аттракции, равный отношению массы корнеплода к массе листьев;

Таблица 1. Параметры использованных светодиодных светильников

| Характеристика                                    | Светодиодный светильник AFI-3000                                                  | Светодиодный светильник AFI-4000                                                   | Светодиодный светильник AFI-5000                                                    |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Спектр излучения                                  |  |  |  |
| PPFD в области 400–700 нм, μмоль/(м²·с)           | 323 ± 21                                                                          | 314 ± 24                                                                           | 320 ± 23                                                                            |
| PPFD в синей области (400–500 нм), μмоль/(м²·с)   | 34 ± 2                                                                            | 59 ± 5                                                                             | 79 ± 6                                                                              |
| PPFD в зеленой области (500–600 нм), μмоль/(м²·с) | 113 ± 7                                                                           | 119 ± 9                                                                            | 121 ± 9                                                                             |
| PPFD в красной области (600–700 нм), μмоль/(м²·с) | 176 ± 11                                                                          | 136 ± 10                                                                           | 120 ± 9                                                                             |
| Облученность, Вт/м²                               | 71.7 ± 4.7                                                                        | 71.0 ± 5.4                                                                         | 73.5 ± 5.2                                                                          |
| Цветовая температура, К                           | 3011                                                                              | 4156                                                                               | 5262                                                                                |
| Индекс цветопередачи CRI, %                       | 97.8                                                                              | 98.0                                                                               | 97.5                                                                                |

— индекс формы корнеплода, определяемый как отношение длины корнеплода к диаметру корнеплода.

**Биохимический состав получаемой растительной продукции.** Определение содержания сухого вещества и влаги проводили методом воздушно тепловой сушки [31], сырую золу — методом сухого озоления [31], нитраты — ионометрическим методом в мг/кг сырого веса (естественной влажности, е.в.) [32], витамин С — титриметрическим методом в мг/100 г е.в. [33], сахара — титриметрическим методом по Бертрону в процентах от сухого вещества [31], хлорофилл *a* и *b*, каротиноиды — фотометрическим методом [31] в мг/100 г е.в., фосфор — фотометрическим методом определения содержания фосфора [33], калий — пламенно-фотометрическим методом [33], магний, кальций, натрий [33] и медь, цинк, железо, марганец [34] — методом пламенной атомно-адсорбционной спектроскопии в % от сухого вещества (с.в.).

**Спектры отраженной от поверхности листьев радиации** регистрировали неинвазивным способом с помощью миниатюрной оптоволоконной спектрометрической системы (“Ocean Optics”,

США), которая обеспечивает оптическое разрешение 0.065 нм в диапазоне от 400 до 1100 нм с шагом 0.3 нм. Для регистрации спектров датчик располагали в средней части листовой пластинки, избегая попадания на центральную жилку. В среднем для каждого варианта регистрировали 10–15 спектров. По полученным спектрам отражения рассчитывали следующие параметры, коррелирующие с фотосинтетической активностью и отражающие физиологическое состояние растений:

— индекс отражения хлорофилла  $ChlRI = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$ , где  $R_{750}$ ,  $R_{705}$ ,  $R_{445}$  — интенсивность отражения света от листовой поверхности на длинах волн 750, 705 и 445 нм соответственно [35];

— отношение суммы каротиноидов к сумме хлорофиллов  $SIP1 = (R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$ , где  $R_{800}$ ,  $R_{445}$ ,  $R_{680}$  — интенсивность отражения света от листовой поверхности на длинах волн 800, 445 и 680 нм соответственно [36];

— фотохимический индекс отражения  $PRI = (R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$ , где  $R_{570}$ ,  $R_{531}$  — интенсивность отражения света от листовой поверхности на длинах волн 570 и 531 нм соответственно [37];

— индекс интенсивности рассеяния света R800, обусловленной структурными особенностями листьев и определяемый как интенсивность отражения на длине волны 800 нм [35].

**Спектры пропускания света листовой поверхностью** регистрировали с помощью спектрального ФАР-метра PG200N (“UPRtek”, Тайвань). Датчик с фотоэлементом диаметром 6 мм и косинусным корректором размещали под листом растения, в верхней его части и сбоку от центральной жилки. Измеряли интенсивность света, проходящего сквозь листовую поверхность, затем лист отодвигали и регистрировали интенсивность излучения источника света в данном положении. По полученным данным определяли коэффициент пропускания  $K_T$  по следующей формуле:

$$K_T = I_L/I_S,$$

где  $I_L$  — интенсивность света, прошедшего сквозь лист растения,  $I_S$  — интенсивность излучения источника света.

**Параметры флуоресценции ФС II** листьев редиса регистрировали с помощью анализатора эффективности фотосинтеза — импульсного портативного флуориметра MINI-PAM-II (“Walz”, Германия) в соответствии со стандартной методикой [38]. Уровень минимальной (возбуждается светом с очень низкой интенсивностью) и максимальной (возбуждается насыщающим световым импульсом) флуоресценции определяли после экспозиции листьев в течение 30 мин в темноте. С использованием специального программного обеспечения WinControl-3 рассчитывали следующие параметры флуоресценции:

— максимальный фотохимический квантовый выход  $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$ , где  $F_o$  — уровень минимальной флуоресценции,  $F_m$  — уровень максимальной флуоресценции [39];

— эффективный фотохимический или реальный квантовый выход  $Y(II) = (F'_m - F_t)/F'_m$ , где  $F'_m$  — максимальный выход флуоресценции адаптированного к свету образца, индуцируется насыщающим импульсом, временно закрывающим все реакционные центры ФС II,  $F_t$  — мгновенный или стационарный уровень флуоресценции адаптированного к свету образца, измеренному прямо перед насыщающим импульсом [40];

— коэффициент фотохимического тушения флуоресценции на свету  $q_P$ , основанный на модели лужи — концепции отдельных антенных блоков ФС II [41];

— коэффициент фотохимического тушения флуоресценции в случае взаимосвязанных антенн ФС II  $q_L$ , основанный на модели озера — множество реакционных центров равномерно распределены по взаимосвязанным антенным блокам ФС II [42];

— коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции на свету  $q_N$  [41];

— коэффициент зеаксантин-зависимого нефотохимического тушения NPQ [43];

— коэффициент квантового выхода свет-индуцированного ( $\Delta pH$ -и зеаксантин-зависимого) нефотохимического тушения флуоресценции  $Y(NPQ)$  [44];

— коэффициент квантового выхода нерегулируемой диссипации тепла и эмиссии флуоресценции, которые не включают транстилакоидную  $\Delta pH$  и зеаксантин,  $Y(NO)$  [44].

**Разность потенциалов в системе корнеобитаемая среда-растения.** Измерение электрических характеристик осуществляли путем размещения в биоэлектрохимических ячейках объемом 440 см<sup>3</sup> биосовместимых коррозионностойких электродов размером 60 × 60 мм в корнеобитаемой среде, что обеспечивало поверхностный электрических контакт с корневой системой и прикорневой зоной [45]. Нижний электрод располагался на расстоянии 30 мм от дна емкости и был выполнен из графитового войлока толщиной 5 мм. Верхний электрод из сетки из нержавеющей стали с размером ячейки 8 × 8 мм размещался на расстоянии 30 мм от нижнего электрода и был электроотрицателен по отношению к нему. Мониторинг изменения разности потенциалов между электродами в корнеобитаемой среде в процессе развития растений редиса проводили с помощью аппаратной платформы Arduino (“Arduino Software”, Китай) каждые 15 мин в течение всего вегетационного периода.

**Статистический анализ.** Вегетационный опыт проводили дважды, размер оцениваемой выборки — 10 растений в каждом варианте опыта. Статистическая оценка полученных данных проводилась путем расчета основных описательных характеристик: среднего, стандартного отклонения, доверительного интервала с применением программ Excel 2016 и Statistica 8 (“Stat-Soft, Inc.”, США). Апостериорный тест Тьюки был использован для выявления различий между средними значениями для каждой характеристики. Значение  $P \leq 0.05$  считалось приемлемым пределом статистической значимости. Значения с разными верхними индексами в столбце достоверно различались ( $P \leq 0.05$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Морфометрические показатели.** Результаты анализа морфометрических показателей растений редиса, выращенных под светодиодными источниками света разного спектрального состава, свидетельствуют о влиянии спектра оптического излучения на формирование надземной и подземной частей редиса и перераспределение ассимилятов между листовой розеткой и фор-

мирующим корнеплодом. Общая масса растений имела близкие значения во всех вариантах опыта; однако под светильниками AFI-5000 наблюдалась четко выраженная тенденция к формированию более крупных корнеплодов и более мелкой листовой розетки по сравнению с вариантами AFI-4000 и AFI-3000 (табл. 2). Так, масса корнеплода в варианте AFI-5000 по сравнению с вариантами AFI-4000 и AFI-3000 была выше на 7 и 10% соответственно; индекс хозяйственной эффективности — на 8%; индекс аттракции — на 31 и 26% соответственно. Различия по величинам индексов аттракции и хозяйственной эффективности для варианта AFI-5000 были статистически достоверными ( $P \leq 0.05$ ). Высота розетки, длина и ширина листовой пластинки, длина черешка были наименьшими в варианте источника света с цветовой температурой 5000 К, при этом растения во всех вариантах опыта формировали одинаковое количество листьев. Наиболее значительные различия между вариантами были выявлены в отношении показателя “процент товарных корнеплодов”: наименьшее значение данного показателя было отмечено в варианте 3000 К (70%), наибольшее — в варианте 5000 К (95%), что отразилось на общем урожае растений. Урожай корнеплодов в варианте AFI-5000 был максимальным среди изученных вариантов (3.45 кг/м<sup>2</sup>) и достоверно превышал таковой для вариантов AFI-4000 и AFI-3000 на 18 и 47% соответственно. Следует отметить, что сорт редиса Петербургский фиолетовый с салатным типом листа можно употреблять в пищу в свежем виде целиком, поэтому общая урожайность растений с учетом надземной части выше на 30–40%. Результаты исследования урожая товарных корнеплодов показали, что эффективность использования светильников располагается в последовательности AFI-5000 > AFI-4000 > AFI-3000.

**Биохимический состав.** Содержание сухого вещества и пигментов в листьях редиса также было подвержено влиянию спектрального состава света. Было выявлено повышение содержания сухого вещества в последовательности AFI-3000 < AFI-4000 < AFI-5000, различия были статистически достоверны ( $P \leq 0.05$ ) между вариантами AFI-3000 и AFI-5000. Также получено статистически значимое повышение содержания фотосинтетических пигментов в той же последовательности (табл. 3). Содержание хлорофилла *a*, *b*, суммы хлорофиллов и каротиноидов в варианте AFI-5000 по сравнению с AFI-3000 было достоверно выше на 18, 22, 18 и 14% соответственно; по сравнению с AFI-4000 — на 10, 19, 12 и 4% соответственно. По содержанию нефотосинтетических пигментов (антоцианов) различий между вариантами не обнаружено.

Биохимический анализ корнеплодов показал, что в варианте AFI-5000 содержание сухого

вещества было достоверно выше, чем в остальных вариантах. Наименьшим содержанием сухого вещества характеризовался вариант AFI-4000 (отличия достоверны при  $P \leq 0.05$ ). Нитраты, содержание которых во всех образцах не превышало ПДК, в меньшей степени накапливались в варианте AFI-5000, где их количество было на 35% меньше, чем в варианте AFI-3000, и на 31% меньше, чем в варианте AFI-4000 (табл. 4). Прослеживалась тенденция к некоторому снижению содержания витамина С от AFI-3000 к AFI-5000. Более низкое содержание моносахаров и суммы сахаров наблюдалось в варианте AFI-4000, в то время как содержание дисахаров было максимальным в варианте AFI-5000, превышая таковое в остальных вариантах в 4 раза.

Данные по содержанию макро- и микроэлементов в исследованных вариантах представлены на рис. 1. В большинстве случаев наблюдалось более высокое содержание элементов для варианта AFI-5000 по сравнению с таковым в вариантах AFI-3000 и AFI-4000: так, в листьях было больше кальция на 28 и 19% (рис. 1а), цинка — на 38 и 50%, марганца — на 1 и 21%, меди — на 255 и 63% соответственно (рис. 1в). В корнеплодах обнаружено значительное повышение содержания микроэлементов при освещении растений источником AFI-5000 — более чем на 50% для железа, цинка и марганца по сравнению с AFI-3000 и AFI-4000 (рис. 1г), тогда как количество макроэлементов практически не отличалось между вариантами (рис. 1б). Для варианта AFI-3000 можно отметить увеличенное содержание калия на 23 и 10% и железа на 46 и 26% в листьях относительно AFI-4000 и AFI-5000 соответственно. В листьях для варианта AFI-4000 наблюдалось повышенное количество магния на 18 и 10%, натрия — на 84 и 119% относительно AFI-3000 и AFI-5000 соответственно.

**Интенсивность флуоресценции.** Параметры флуоресценции, характеризующие эффективность работы фотосинтетического аппарата, регистрировали на 22 день вегетационного периода на развитых листьях верхнего яруса (рис. 2). Максимальный фотохимический квантовый выход Fv/Fm практически не отличался между вариантами и составлял 0.819 для AFI-3000 и AFI-5000 и 0.820 для AFI-4000. Реальный квантовый выход Y(II), характеризующий соотношение числа квантов, используемых в фотохимических реакциях, к общему числу поглощенных квантов, был достоверно выше на 88% для растений редиса, освещаемых AFI-5000, по сравнению с использованием светильников AFI-4000, и в виде тенденции на 12% больше, чем для источников света AFI-3000. Пониженное значение Y(II) может быть показателем снижения эффективности ассимиляции и замедления переноса электронов в ФСІ и ФСІІ. Коэффициент фото-

**Таблица 2.** Морфометрические параметры растений редиса при их выращивании с использованием источников света различного спектрального состава

| Параметр                              | Светодиодный<br>светильник AFI-3000                                               | Светодиодный<br>светильник AFI-4000                                                | Светодиодный<br>светильник AFI-5000                                                 |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Вид растений                          |  |  |  |
| Масса общая, г                        | $30.31 \pm 1.95^a$                                                                | $31.14 \pm 4.32^a$                                                                 | $30.68 \pm 4.96^a$                                                                  |
| Масса корнеплода, г                   | $19.97 \pm 1.51^a$                                                                | $20.53 \pm 3.16^a$                                                                 | $21.89 \pm 3.88^a$                                                                  |
| Масса листьев, г                      | $10.34 \pm 1.11^a$                                                                | $10.62 \pm 1.27^a$                                                                 | $8.79 \pm 1.40^a$                                                                   |
| Индекс хозяйственной<br>эффективности | $0.66 \pm 0.03^a$                                                                 | $0.66 \pm 0.02^a$                                                                  | $0.71 \pm 0.03^b$                                                                   |
| Индекс аттракции                      | $2.00 \pm 0.23^a$                                                                 | $1.93 \pm 0.15^a$                                                                  | $2.52 \pm 0.34^b$                                                                   |
| Высота розетки, см                    | $13.43 \pm 0.27^a$                                                                | $14.25 \pm 0.96^a$                                                                 | $12.70 \pm 1.24^a$                                                                  |
| Диаметр розетки, см                   | $17.00 \pm 1.46^a$                                                                | $17.75 \pm 1.00^a$                                                                 | $16.50 \pm 1.71^a$                                                                  |
| Число листьев                         | $6.57 \pm 0.27^a$                                                                 | $6.75 \pm 0.39^a$                                                                  | $6.70 \pm 0.42^a$                                                                   |
| Длина листа, см                       | $10.86 \pm 0.64^a$                                                                | $10.12 \pm 0.53^a$                                                                 | $9.95 \pm 0.36^a$                                                                   |
| Ширина листа, см                      | $6.93 \pm 0.31^a$                                                                 | $6.75 \pm 0.36^a$                                                                  | $6.25 \pm 0.51^a$                                                                   |
| Длина черешка                         | $6.43 \pm 0.27^a$                                                                 | $7.63 \pm 0.77^b$                                                                  | $6.30 \pm 0.59^a$                                                                   |
| Длина корнеплода, см                  | $5.29 \pm 0.20^a$                                                                 | $5.63 \pm 0.63^a$                                                                  | $5.50 \pm 0.57^a$                                                                   |
| Диаметр корнеплода, см                | $2.47 \pm 0.10^a$                                                                 | $2.21 \pm 0.35^b$                                                                  | $2.76 \pm 0.20^a$                                                                   |
| Индекс корнеплода                     | $2.15 \pm 0.21^a$                                                                 | $2.57 \pm 0.39^a$                                                                  | $2.01 \pm 0.22^a$                                                                   |
| Товарность, %                         | $70 \pm 4^a$                                                                      | $85 \pm 6^b$                                                                       | $95 \pm 4^c$                                                                        |
| Урожай, кг/м <sup>2</sup>             | $2.35 \pm 0.28^a$                                                                 | $2.93 \pm 0.21^b$                                                                  | $3.45 \pm 0.27^c$                                                                   |

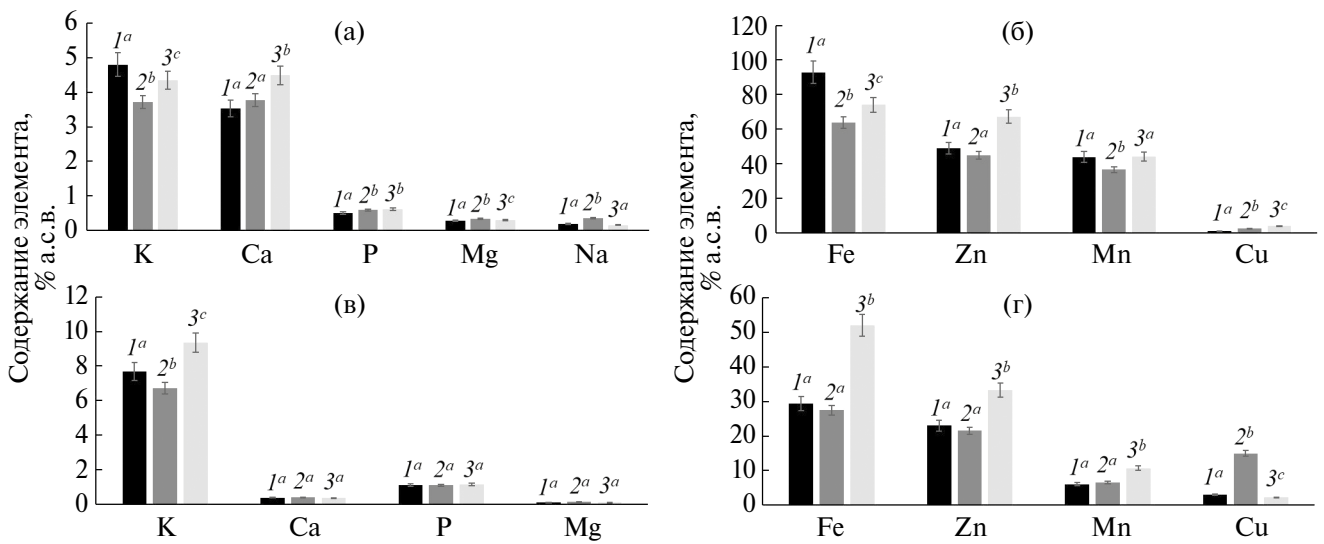
**Таблица 3.** Содержание сухого вещества и пигментов в листьях редиса при их выращивании с использованием источников света различного спектрального состава

| Параметр                                       | Светодиодный<br>светильник AFI-3000 | Светодиодный<br>светильник AFI-4000 | Светодиодный<br>светильник AFI-5000 |
|------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Сухое вещество, %                              | $7.83 \pm 0.50^a$                   | $8.48 \pm 0.41^{a,b}$               | $8.88 \pm 0.50^b$                   |
| Хлорофилл <i>a</i> , мг/100 г е.в.             | $109.77 \pm 6.15^a$                 | $120.72 \pm 7.73^{a,b}$             | $129.66 \pm 8.30^b$                 |
| Хлорофилл <i>b</i> , мг/100 г е.в.             | $40.06 \pm 2.24^a$                  | $47.51 \pm 3.04^b$                  | $48.96 \pm 3.13^b$                  |
| Сумма хлорофиллов <i>a + b</i> , мг/100 г е.в. | $149.84 \pm 8.39^a$                 | $168.23 \pm 10.77^{a,b}$            | $176.62 \pm 11.43^b$                |
| Каротиноиды, мг/100 г е.в.                     | $34.56 \pm 1.93^a$                  | $36.06 \pm 2.31^{a,b}$              | $39.46 \pm 2.53^b$                  |
| Антоцианы, мг/100 г е.в.                       | $0.023 \pm 0.006^a$                 | $0.013 \pm 0.004^a$                 | $0.018 \pm 0.04^a$                  |



**Таблица 4.** Содержание сухого вещества, нитратов, витамина С и сахаров в корнеплодах редиса при их выращивании с использованием источников света различного спектрального состава

| Параметр                 | Светодиодный светильник AFI-3000 | Светодиодный светильник AFI-4000 | Светодиодный светильник AFI-5000 |
|--------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Сухое вещество, %        | 4.75 ± 0.23 <sup>a</sup>         | 4.06 ± 0.23 <sup>b</sup>         | 5.31 ± 0.30 <sup>c</sup>         |
| Нитраты, мг/кг е.в.      | 1867.9 ± 224.2 <sup>a</sup>      | 1743.3 ± 209.2 <sup>a</sup>      | 1206.0 ± 144.8 <sup>b</sup>      |
| Витамин С, мг/100 г е.в. | 8.58 ± 0.76 <sup>a</sup>         | 8.14 ± 0.78 <sup>a</sup>         | 7.70 ± 0.74 <sup>a</sup>         |
| Моносахара, % с.в.       | 32.24 ± 2.48 <sup>a</sup>        | 21.39 ± 2.05 <sup>b</sup>        | 25.49 ± 2.45 <sup>b</sup>        |
| Дисахара, % с.в.         | 1.03 ± 0.11 <sup>a</sup>         | 0.95 ± 0.11 <sup>a</sup>         | 3.97 ± 0.48 <sup>b</sup>         |
| Сумма сахаров, % с.в.    | 33.27 ± 2.94 <sup>a</sup>        | 22.34 ± 2.17 <sup>b</sup>        | 29.64 ± 2.92 <sup>a</sup>        |



**Рис. 1.** Содержание калия, кальция, фосфора, магния, натрия в листьях (а) и корнеплодах (в) редиса; железа, цинка, марганца, меди в листьях (б) и корнеплодах (г) редиса при выращивании с использованием источников света различного спектрального состава: 1 – AFI-3000, 2 – AFI-4000, 3 – AFI-5000.

химического тушения флуоресценции на свету qP, рассчитываемый по концепции отдельных антенных блоков ФС II, и коэффициент qL, определяемый исходя из того, что множество реакционных центров равномерно распределены по взаимосвязанным антенным блокам ФС II, коррелировали между собой (коэффициент корреляции  $r = 1$ ) и были статистически достоверно выше для варианта AFI-5000 – qP на 94%, qL на 139% относительно AFI-4000 и в виде тенденции – qP на 11%, qL на 14% по сравнению с AFI-3000. Коэффициенты нефотохимического тушения флуоресценции на свету qN и зеаксантин-зависимого нефотохимического тушения NPQ так же, как и ожидалось, коррелировали между собой (коэффициент корреляции  $r = 0.99$ ) и имели достоверно увеличенное значение для AFI-5000 – qN на 31%, NPQ на 65% относительно AFI-4000 и в виде тенденции – qN на 2%, NPQ на 4% по сравнению с AFI-3000. Коэффициенты

Y(NPQ) квантового выхода свето-индуцированного ( $\Delta pH$ -и зеаксантин-зависимого) нефотохимического тушения флуоресценции были одинаковыми для вариантов AFI-3000 и AFI-5000 и превышали вариант AFI-4000 на 30%. Коэффициент Y(NO) квантового выхода нерегулируемой диссипации тепла и эмиссии флуоресценции для варианта AFI-4000 был статистически достоверно выше на 22% по сравнению с AFI-3000 и на 27% относительно AFI-5000. Высокое значение Y(NO) сигнализирует о том, что избыточная энергия возбуждения достигает реакционных центров, что приводит к сильному снижению активности акцепторов ФС II и фотоповреждению.

**Индексы отражения света листовой поверхностью.** Индексы отражения, характеризующие емкость и эффективность работы фотосинтетического аппарата растений редиса, регистрировали на 26 день вегетационного периода (рис. 3). Полученные индексы отражения хлорофилла



ChlRI статистически не различались между вариантами, однако наблюдалась некоторая тенденция к увеличению этого показателя для варианта AFI-3000 на 3 и 7% относительно AFI-4000 и AFI-5000 соответственно. С одной стороны, это не соотносится с биохимическими данными по содержанию пигментов в исследованных образцах, где наибольшее количество хлорофиллов было характерно для листьев растений редиса, освещаемых в процессе роста светильниками AFI-5000. Однако при этом для варианта AFI-3000 также зарегистрировано достоверное увеличение индекса интенсивности рассеяния света R800 — на 18% по сравнению с AFI-5000 и в виде тенденции на 6% относительно AFI-4000, что может говорить о менее эффективном использовании световой энергии листьями в данном варианте освещения. ChlRI характеризует емкость фотосинтетического аппарата растений и потенциальную возможность растения поглощать свет, а SIPI и R800 — эффективность его работы. Изменение отражения в ближней инфракрасной области (R800) является следствием структурных изменений, связанных с размерами клеток эпидермиса, наличием кутикулы и опушения.

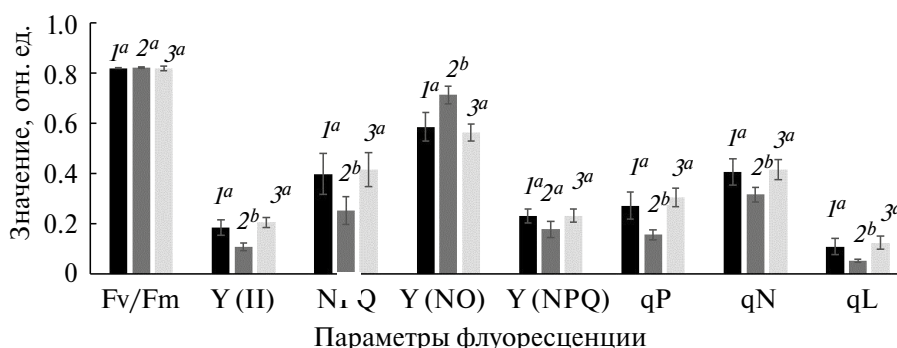
Отмечена тенденция к увеличению индекса фотохимической активности фотосинтетического аппарата PRI для варианта AFI-4000: он был выше на 38% по сравнению с AFI-3000 и на 29% относительно AFI-5000. Величина PRI определяется интенсивностью тепловой диссипации и тесно связана с параметрами флуоресценции, характеризующими нефотохимическое тушение.

**Коэффициент пропускания света листовой поверхностью.** Наибольший коэффициент пропускания света листом был характерен для варианта AFI-4000 —  $K_T = 0.075 \pm 0.011$ . Он достоверно

отличался на 20% от  $K_T = 0.062 \pm 0.003$ , полученного для листовой поверхности редиса, освещаемого источником AFI-5000, и в виде тенденции на 12% от значения  $K_T = 0.067 \pm 0.006$ , измеренного для варианта AFI-3000. Можно сделать вывод, что листья редиса, выращенные с использованием светильников AFI-5000, поглощали большее количество света, чем листья, облучаемые в процессы развития AFI-3000 и AFI-4000.

**Электрофизиологические показатели.** Динамика формирования разности потенциалов в корнеобитаемой среде редиса была схожа для всех вариантов (рис. 4): рост напряжения в первые два дня, затем стабилизация на среднем уровне  $394 \pm 23$  мВ для AFI-5000,  $396 \pm 21$  мВ для AFI-4000 и  $374 \pm 23$  мВ для AFI-3000 до десятого дня вегетационного периода. После этого для вариантов AFI-5000 и AFI-4000 наблюдался рост разности потенциалов до  $424 \pm 34$  мВ и  $403 \pm 29$  мВ соответственно. При этом для AFI-3000 напряжение, наоборот, спало до значений  $283 \pm 59$  мВ. Вероятно, период с 10 по 20 дни соответствовал активному росту корнеплода и связанными с этим интенсивными метаболическими процессами в корнеобитаемой среде, на которые, видимо, положительным образом влияет большая доля синего света в спектре освещения. После 21 дня для всех вариантов наблюдалось уменьшение интенсивности генерации разности потенциалов, что может говорить о снижении роли концентрационных эффектов и замедлении процессов распределения питательных веществ по градиенту глубины торфа в связи с усилением физиологических процессов накопления биомассы корнеплодов.

Интересно отметить, что водородный показатель pH составлял для AFI-5000 в области верхнего электрода — 7.19, нижнего электрода —



**Рис. 2.** Параметры флуоресценции при выращивании редиса с использованием источников света различного спектрального состава: 1 — AFI-3000, 2 — AFI-4000, 3 — AFI-5000. Fv/Fm — максимальный фотохимический выход ФС II; Y(II) — эффективный фотохимический выход ФС II; qP — коэффициент фотохимического тушения флуоресценции на свету; qL — коэффициент фотохимического тушения флуоресценции в случае взаимосвязанных антенн ФС II; qN — коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции; NPQ — коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции, рассчитываемый согласно уравнению Штерна-Фольмера; Y(NO) — нерегулируемые потери энергии возбуждения; Y(NPQ) — регулируемые потери энергии возбуждения за счет диссипации тепла с участием ДрН- и зеаксантин-зависимых механизмов.

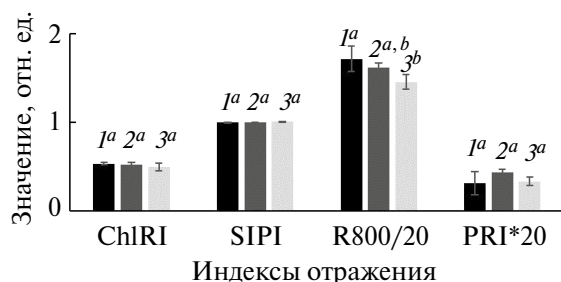
7.30, для AFI-4000 в области верхнего электрода — 7.36 и нижнего — 7.42, тогда как для AFI-3000 эти показатели практически не отличались и составляли 7.51 для верхней области и 7.47 для нижней. Это может свидетельствовать о том, что в формировании разности потенциалов в корнеобитаемой среде участвуют окислительно-восстановительные процессы, сопутствующие жизнедеятельности растений и окружающей их микрофлоры, вследствие которых возникает градиент концентраций. В данном случае, в вариантах AFI-5000 и AFI-4000 в области верхнего электрода присутствует большее количество ионов водорода по сравнению с нижним, а для AFI-3000 различий концентраций не наблюдается, что может быть одной из причин формирования более низкой разности потенциалов.

В целом, максимальная генерация напряжения 532 мВ наблюдалась в корнеобитаемой

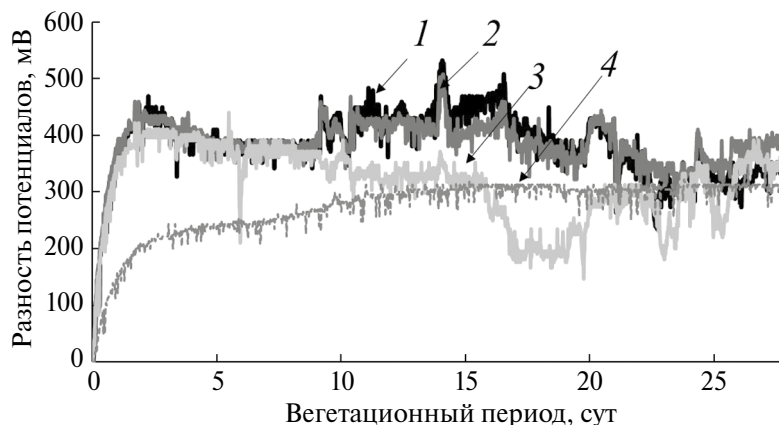
среде редиса, освещаемого в процессе роста светодиодами AFI-5000, для AFI-4000 эта величина составила 508 мВ, а для AFI-3000 — 439 мВ. Среднее значение в течение всего вегетационного периода составило  $384 \pm 58$  мВ для AFI-5000,  $385 \pm 47$  мВ для AFI-4000 и  $314 \pm 65$  мВ для AFI-3000.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные комплексные исследования выявили достоверное увеличение массы и размеров корнеплодов, содержания сухого вещества и фотосинтетических пигментов, увеличение содержания макро- и микроэлементов в листьях (кальция, фосфора, цинка, марганца, меди) и корнеплодах (калия, железа, цинка, марганца), уменьшение количества нитратов, повышение коэффициентов эффективного фотохимического выхода, фотохимического и нефотохимического тушения флуоресценции, а также показали высокую генерацию разности потенциалов в корнеобитаемой среде для растений редиса, освещаемых в процессе роста источником света AFI-5000 со спектром, близким к солнечному свету в полдень, с соотношением синего : зеленого : красного диапазонов 25% : 38% : 37% по сравнению с другими исследованными вариантами. Для растений редиса, выращенных с использованием светодиодных светильников AFI-3000 со спектральным составом в видимой области, приближенным к естественному свету, когда солнце находится у горизонта, с отношением основных диапазонов спектра 11% : 35% : 54%, отмечено увеличение количества сахаров, но при этом наблюдалось также накопление нитратов и высокая доля рассеяния света листом. Светодиодные светильники AFI-4000 с наиболее нейтральным освещением, приближенным к утреннему и послеобеденному свету, с



**Рис. 3.** Индексы отражения при выращивании редиса с использованием источников света различного спектрального состава: 1 — AFI-3000, 2 — AFI-4000, 3 — AFI-5000. ChlRI — индекс отражения хлорофилла; SIPI — отношение суммы каротиноидов к сумме хлорофиллов; R800/20 — индекс интенсивности рассеяния света, разделенный на 20 отн. ед. для масштаба; PRI\*20 — индекс фотохимической активности фотосинтетического аппарата, умноженный на 20 отн. ед. для масштаба.



**Рис. 4.** Формирование разности потенциалов в корнеобитаемой среде редиса в процессе его выращивания с использованием источников света различного спектрального состава: 1 — AFI-5000, 2 — AFI-4000, 3 — AFI-3000, 4 — контроль без растения.

соотношением областей спектра 19%:38%:43% показали наихудший результат из исследованных вариантов — повышенные нерегулируемые потери энергии возбуждения и пропускание света листовой поверхностью.

На основе полученных данных была составлена сводная таблица, в которой представлены все достоверно отличавшиеся показатели (табл. 5). Им были присвоены баллы — 1.0 для варианта с минимальным параметром, к двум другим добавлен тот процент от балла, на который данный показатель отличался от варианта с наименьшим показателем. Для содержания нитратов, коэффициента нерегулируемых потерь энергии возбуждения, индекса рассеяния света и коэффициента пропускания света разница в значениях вычиталась из 1.0, так как увеличенные значения этих параметров связаны с негативным воздействием внешних факторов на состояние растений. Полученная сумма баллов для исследованных вариантов была следующей: AFI-3000 — 19.9, AFI-4000 — 18.2, AFI-5000 —

22.1 балл, что подтверждает наибольшее положительное влияние на растения редиса источника света с наиболее равномерным распределением энергии фотонов по диапазонам спектра и большей долей синего света по отношению к другим использованным светильникам.

Наши результаты согласуются с данными, полученными другими исследователями. Так, спектр излучения, приближенный к солнечному, положительно влияет на растения, увеличивая их продуктивность за счет формирования большей площади листа и эффективного усвоения энергии света [24]. Увеличение доли синего света в спектре способствует изменению фотосинтетических характеристик (фотосинтетического потенциала, скорости фотосинтеза, числа и размеров устьиц) и стимулирует физиологические реакции у салата, в результате чего наблюдается увеличение сухой биомассы, числа листьев и площади листовой поверхности [46]. Увеличение доли зеленого и снижение доли синего света в спектре вызывает вытягивание рас-

**Таблица 5.** Сводные результаты, сравнивающие различия в процентном соотношении между исследованными фотосинтетическими, электро- и морфофизиологическими показателями редиса, освещаемого в процессе роста источниками света с разным спектральным составом

| Параметр                                                      | Балл                                   |                                        |                                        |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
|                                                               | Светодиодный<br>светильник<br>AFI-3000 | Светодиодный<br>светильник<br>AFI-4000 | Светодиодный<br>светильник<br>AFI-5000 |
| Индекс хозяйственной эффективности                            | 1.0                                    | 1.0                                    | 1.1                                    |
| Индекс аттракции                                              | 1.0                                    | 1.0                                    | 1.3                                    |
| Длина черешка                                                 | 1.0                                    | 1.2                                    | 1.0                                    |
| Диаметр корнеплода                                            | 1.1                                    | 1.0                                    | 1.2                                    |
| Сухое вещество листьев                                        | 1.0                                    | 1.1                                    | 1.1                                    |
| Сумма хлорофиллов <i>a</i> и <i>b</i>                         | 1.0                                    | 1.1                                    | 1.2                                    |
| Каротиноиды                                                   | 1.0                                    | 1.0                                    | 1.1                                    |
| Сухое вещество                                                | 1.2                                    | 1.0                                    | 1.3                                    |
| Нитраты                                                       | 0.6                                    | 0.7                                    | 1.0                                    |
| Сумма сахаров                                                 | 1.5                                    | 1.0                                    | 1.3                                    |
| Эффективный фотохимический выход ФС II Y (II)                 | 1.7                                    | 1.0                                    | 1.9                                    |
| Нерегулируемые потери энергии возбуждения Y (NO)              | 1.0                                    | 0.8                                    | 1.0                                    |
| Коэффициент фотохимического тушения флуоресценции на свету qP | 1.8                                    | 1.0                                    | 1.9                                    |
| Коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции qN        | 1.3                                    | 1.0                                    | 1.3                                    |
| Индекс интенсивности рассеяния света R800                     | 0.8                                    | 0.9                                    | 1.0                                    |
| Коэффициент пропускания света K <sub>T</sub>                  | 0.9                                    | 1.0                                    | 0.8                                    |
| Средняя разность потенциалов в корнеобитаемой среде           | 1.0                                    | 1.2                                    | 1.2                                    |
| Максимальная разность потенциалов в корнеобитаемой среде      | 1.0                                    | 1.2                                    | 1.2                                    |
| <b>Итого</b>                                                  | <b>19.9</b>                            | <b>18.2</b>                            | <b>22.1</b>                            |

тений, а также приводит к снижению их сырой и сухой биомассы [47]. Добавление синего света (от 25 до 50% в спектре) достоверно повышает урожай и содержание макро- и микроэлементов у микрозелени сем. Brassicaceae – горчицы и кейла [48]. Синий свет стимулирует рост растений редиса, шпината и салата, существенно повышая биомассу растений, включая как надземную часть, так и корнеплод, а также способствует значительному увеличению содержания общего хлорофилла [49].

Таким образом, наши исследования показали, что применение источника света со спектром, приближенным к солнечному свету в полдень с цветовой температурой 5000 К, по сравнению со светильником с цветовой температурой 3000 К, спектр которого приближен к естественному свету, когда солнце находится у горизонта, и с цветовой температурой 4000 К с наиболее нейтральным освещением, приближенным к утреннему и послеобеденному свету, способствовало получению более высоких показателей, характеризующих активность и эффективность работы фотосинтетического аппарата и интенсивность физико-химических процессов в корнеобитаемой среде, что, в конечном итоге, обеспечило максимальный выход растительной продукции в данном варианте 5000 К. Вероятно, этот положительный эффект связан с наличием в спектре большей доли синего света, влияющего на развитие корневой системы.

В целом, светодиодные светильники, имитирующие солнечный свет, можно рассматривать как перспективный источник света для управляемого экологичного сельского хозяйства, в том числе для применения в территориально удаленных районах. Однако следует заметить, что разные культуры по-разному реагируют на спектральный состав световой среды, поэтому расширение объема исследований реакции растений на спектральный состав применяемых источников света необходимо для увеличения эффективности производства растительной продукции в контролируемых условиях среды и повышения ее качества.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда согласно соглашению № 23-26-10050 от 20.04.2023 г. и Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением № 23-26-10050 от 05.05.2023 г., грант № 23-26-10050.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы Т.Э. Кулешова и Н.Г. Синявина придумали и провели эксперимент, В.Е. Вертебный,

Ю.В. Хомяков осуществили биохимические исследования, Е.М. Эзерина фотосинтетические измерения, Н.Г. Синявина и А.А. Кочетов морфометрические измерения, Т.Э. Кулешова и П.В. Желначева электрические измерения. Т.Э. Кулешова, Г.Г. Панова, А.А. Кочетов и Н.Г. Синявина участвовали в обработке и анализе данных. Авторы Т.Э. Кулешова, Е.М. Эзерина и Н.Г. Синявина участвовали в написании текста статьи. Все авторы участвовали в обсуждении результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naikoo N.B., Kanth R.H., Bahar F.A., Bhat M.A., Nazir A., Mahdi S.S., Amin Z., Singh L., Raja W., Saad A.A., Bhat T.A., Palmo T., Ahngar T.A. Vertical farming: The future of agriculture: A review // *Pharma Innovation*. 2022. V. 11. P. 1175.
2. Kozai T., Niu G. Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas // *Plant Factory* / Eds. Kozai T. et al. Burlington: Academic Press, 2020. P. 7.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00002-9>
3. Goto E. Plant production in a closed plant factory with artificial lighting // *Acta Hort.* 2012. V. 956. P. 37.  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.2>
4. Kozai T., Niu G., Takagaki M. *Plant Factory: an Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production*. Cambridge, UK: Academic Press, 2019. 487 p.
5. Панова Г.Г., Черноусов И.Н., Удалова О.Р., Александров А.В., Карманов И.В., Аникина Л.М., Судачков В.Л., Якушев В.П. Научно-технические основы круглогодичного получения высоких урожаев качественной растительной продукции при искусственном освещении // Докл. РАСХН. Т. 4. С. 17.
6. Csambalik L., Diveky-Ertsey A., Gal I., Madaras K., Sipos L., Szekely G., Pusztai P. Sustainability perspectives of organic farming and plant factory systems – from divergences towards synergies // *Horticulturae*. 2023. V. 9. P. 895.  
<https://doi.org/10.3390/horticulturae9080895>
7. Wong C. E., Teo Z. W. N., Shen L., Yu H. Seeing the lights for leafy greens in indoor vertical farming // *Trends Food Sci. Technol.* 2020. V. 106. P. 48.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.031>
8. Samantara K., Bohra A., Mohapatra S.R., Prihatini R., Asibe F., Singh L., Reyes V.P., Tiwari A., Maurya A.K., Croser J.S., Wani S.H., Siddique K.H.M., Varshney R.K. Breeding more crops in less time: a perspective on speed breeding // *Biology*. 2022. V. 11. P. 275.  
<https://doi.org/10.3390/biology11020275>
9. Kochetov A.A., Mirskaya G.V., Sinyavina N.G., Egorova K.V. Transgressive breeding: A methodology for accelerated creation of new forms of plants with a predictable complex of economically valuable traits // *Russ. Agric. Sci.* 2021. V. 47. P. 40.  
<https://doi.org/10.3103/S1068367422010050>

10. Ермаков Е.И., Черноусов И.Н. Регулируемая агроэкосистема как основа изучения и управления продукционным процессом растений // Матер. Всерос. конф. "Управление продукционным процессом растений в регулируемых условиях". Санкт-Петербург: АФИ, 1996. С. 14.
11. Paradiso R., Proietti S. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: The state of the art and the opportunities of modern LED systems // J. Plant Growth Regul. 2022. V. 41. P. 742. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>
12. Кулешова Т.Э., Удалова О.Р., Балашова И.Т., Аникина Л.М., Конончук П.Ю., Мирская Г.В., Дубовицкая В.И., Вертебный В.Е., Хомяков Ю.В., Панова Г.Г. Особенности влияния спектра излучения на продуктивность и биохимический состав тестовых плодовых и листовых овощных культур // Журн. техн. физ. 2022. Т. 92. С. 1060. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.07.52663.343-21>
13. Протасова Н.Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // Физиология растений. 1987. Т. 34. С. 812.
14. Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Лисовский Г.М. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы. Новосибирск, 2000. 213 с.
15. Avercheva O.V., Berkovich Y.A., Erokhin A.N., Zhigalova T.V., Pogosyan S.I., Smolyanina S.O. Growth and photosynthesis of Chinese cabbage plants grown under light-emitting diode-based light source // Russ. J. Plant Physiol. 2009. V. 56. P. 14. <https://doi.org/10.1134/S1021443709010038>
16. Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г. Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зеленных культур // Светотехника. 2018. Т. 5. С. 6.
17. Wu B.S., Hitti Y., MacPherson S., Orsat V., Lefsrud M.G. Comparison and perspective of conventional and LED lighting for photobiology and industry applications // Environ. Exp. Bot. 2020. V. 171. P. 103953. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103953>
18. Кулешова Т.Э., Удалова О.Р., Балашова И.Т., Аникина Л.М., Конончук П.Ю., Мирская Г.В., Панова Г.Г. Влияние различных источников света на продукционный процесс томата в интенсивной светокультуре // Овощи России. 2021. Т. 4. С. 65. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2021-4-65-70>
19. Santin M., Ranieri A., Castagna A. Anything new under the sun? An update on modulation of bioactive compounds by different wavelengths in agricultural plants // Plants. 2021. V. 10. P. 1485. <https://doi.org/10.3390/plants10071485>
20. Tang Y., Jia M., Mei Y., Yu Y., Zhang J., Tang R., Song K. 3D intelligent supplement light illumination using hybrid sunlight and LED for greenhouse plants // Optik. 2019. V. 183. P. 367. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.002>
21. Zhuo Y., Zhu H., Shen C., Sun G., Liu J.G. Violet chip excited white LEDs for sun-like lighting and horticulture lighting // Proc. 16th China International Forum on Solid State Lighting & International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (25–27 November 2019). China, Shenzhen). 2019. P. 85. <https://doi.org/10.1109/SSLChinaIFWS49075.2019.9019777>
22. Massa G.D., Kim H.H., Wheeler R.M., Mitchell C.A. Plant productivity in response to LED lighting // HortScience. 2008. V. 43. P. 1951. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1951>
23. Menendez-Velazquez A., Morales D., Garcia-Delgado A.B. Sunlike white light-emitting diodes based on rare-earth-free luminescent materials // Materials. 2022. V. 15. P. 1680. <https://doi.org/10.3390/ma15051680>
24. Jie Z., Cheng-bo Z., Hong X., Rui-feng C., Qi-chang Y., Tao L. The effect of artificial solar spectrum on growth of cucumber and lettuce under controlled environment // J. Integr. Agric. 2020. V. 19. P. 2027. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63209-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63209-9)
25. Романенко С.А., Туранов С.Б. Исследование влияния спектрального состава облучения на рост и развитие тепличного редиса // Матер. XIII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием в рамках IV Всерос. светотехнического форума с междунар. участием. Саранск, 2017. С. 284.
26. Miler N., Kulus D., Wozny A., Rymarz D., Hajzer M., Wierzbowski K., Nelke R., Szeffs L. Application of wide-spectrum light-emitting diodes in micropropagation of popular ornamental plant species: A study on plant quality and cost reduction // In Vitro Cell. Dev. Biol.— Plant. 2019. V. 55. P. 99. <https://doi.org/10.1007/s11627-018-9939-5>
27. Sinyavina N.G., Kochetov A.A., Kocherina N.V., Egorova K.V., Kurina A.B., Panova G.G., Chesnokov Y.V. Breeding approaches for controlled conditions of artificial light culture for small radish and radish (*Raphanus sativus* L.) // Horticulturae. 2023. V. 9. P. 678. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060678>
28. Кочетов А.А., Синявина Н.Г. РФ Патент 11518, 2021.
29. Panova G.G., Udalova O.R., Kanash E.V., Galushko A.S., Kochetov A.A., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V., Chernousov I.N. Fundamentals of physical modeling of "ideal" agroecosystems // Tech. Phys. 2020. V. 65. P. 1563. <https://doi.org/10.1134/S1063784220100163>
30. King D.L., Kratochvil J.A., Boyson W.E. Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors // Conf. Rec. 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. USA, CA, Anaheim, 1997. P. 1113. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654283>
31. Ермаков А.И. Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 429 с.
32. Методические указания по определению нитратов и нитритов в продукции растениеводства. М.: МЗ РСФСР, 1990. 49 с.

33. Скурихин И.М., Тутельян В.А. Руководство по методам анализа качества и безопасности пищевых продуктов. Москва: Изд-во Медицина, 1998. 342 с.
34. ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовых долей металлов в осадках сточных вод, донных отложениях, образцах растительного происхождения спектральными методами. ФБУ ФЦАО, 2011. 45 с. <https://gostrf.com/normadata/1/4293793/4293793107.htm?ysclid=lox20vb89u875180587>
35. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sens. Environ.* 2002. V. 81. P. 337. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
36. Penuelas J., Barret F., Filella I. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status // *Int. J. Remote Sens.* 1993. V. 14. P. 1887. <https://doi.org/10.1080/01431169308954010>
37. Gamon J.A., Serrano L., Surfus J.S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels // *Physiol. Comp. Oecol.* 1997. V. 112. P. 492. <https://doi.org/10.1007/s004420050337>
38. MINI-PAM Photosynthesis Yield Analyzer Manual. Edition 3, Heinz Walz GmbH, 2018. 197 p.
39. Kitajima M., Butler W.L. Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone // *BBA, Biochim. Biophys. Acta, Bioenerg.* 1975. V. 376. P. 105. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(75\)90209-1](https://doi.org/10.1016/0005-2728(75)90209-1)
40. Genty B., Briantais J.M., Baker N.R. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence // *BBA, Biochim. Biophys. Acta, Gen. Subj.* 1989. V. 990. P. 87. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(89)80016-9)
41. Schreiber U., Schliwa U., Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer // *Photosynth. Res.* 1986. V. 10. P. 51. <https://doi.org/10.1007/BF00024185>
42. Kramer D.M., Johnson G., Kiirats O., Edwards G.E. New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes // *Photosynth. Res.* 2004. V. 79. P. 209. <https://doi.org/10.1023/B:PRES.0000015391.99477.0d>
43. Bilger W., Bjorkman O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis* // *Photosynth. Res.* 1990. V. 25. P. 173. <https://doi.org/10.1007/BF00033159>
44. Genty B., Harbinson J., Cailly A.L., Rizza F. Fate of excitation at PS II in leaves: the non-photochemical side // Proc. 3rd BBSRC Robert Hill Symposium on Photosynthesis (March 31 – April 3, 1996), University of Sheffield, Western Bank, Sheffield, UK. Abstract P28.
45. Kuleshova T.E., Bushlyakova A.V., Gall N.R. Noninvasive measurement of bioelectric potentials of plants // *Tech. Phys. Lett.* V. 45. P. 190. <https://doi.org/10.21883/10.1134/S1063785019030106>
46. Wang J., Lu W., Tong Y., Yang Q. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light // *Front. Recent Dev. Plant Sci.* 2016. V. 7. P. 64. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00250>
47. Наконечная О.В., Холин А.С., Субботин Е.П., Бурковская, Е.В., Хроленко Ю.А., Гафицкая И.В., Орловская И.Ю., Бурдуковский, М.Л., Михеева А.В., Кульчин Ю.Н. Влияние светодиодного освещения разного спектра на развитие салата листового (*Lactuca sativa*) // *Изв. РАН. Сер. биол.* 2023. Т. 3. С. 278. <https://doi.org/10.31857/S1026347022600406>
48. Brazaityte A., Miliauskiene J., Vastakaitė-Kairienė V., Sutuliene R., Lauzike K., Duchovskis P., Malek S. Effect of different ratios of blue and red led light on Brassicaceae microgreens under a controlled environment // *Plants.* 2021. V. 10. P. 801. <https://doi.org/10.3390/plants10040801>
49. Yorio N.C., Goins G.D., Kagie H.R., Wheeler R.M., Sager J.C. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation // *HortScience.* 2001. V. 36. P. 380. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.36.2.380>