

Научная статья

УДК 58.084.1

DOI: 10.31857/S0869769825010029

EDN: HILQQW

Влияние спектрального состава и интенсивности света на развитие микрорастений *Solanum tuberosum* L.

Ю. Н. Кульчин, И. В. Гафицкая, О. В. Наконечная, С. О. Кожанов[✉],
А. С. Холин, Е. П. Субботин, Н. И. Субботина

Юрий Николаевич Кульчин

академик РАН, доктор физико-математических наук

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

kulchin@iacp.dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8750-4775>

Ирина Викторовна Гафицкая

ведущий инженер

ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

gafitskaya@biosoil.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3100-8668>

Ольга Валериевна Наконечная

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

markelova@biosoil.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9825-277X>

Сергей Олегович Кожанов

младший научный сотрудник

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

kozhanov_57@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0001-2629-3521>

Александр Сергеевич Холин

научный сотрудник

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

a_kholin@dvo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9751-5136>

Евгений Петрович Субботин

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

s.e.p@list.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8658-3504>

Наталья Ивановна Субботина
младший научный сотрудник
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
sale789@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0945-3877>

Аннотация. В работе исследуется влияние на развитие микрорастений картофеля (*Solanum tuberosum* L.) сорта Рэд Скарлетт монохроматического света красного, зеленого и синего диапазонов спектра с различным уровнем интенсивности облучения (30–1400 мкмоль/с·м²). Наибольшие значения параметров высоты и массы растений наблюдались у образцов, культивированных при красном свете, а наименьшие – в группах с освещением синим светом. Синий свет ограничивал рост стебля и больше способствовал образованию крупных листьев. Морфометрические показатели растений, выращенных при зеленом свете, были выше, чем культивированных при синем, однако меньше значений образцов из секций с красным светом. Оптимальными для развития микрорастений картофеля были интенсивности освещения: при СС и ЗС – 500–600 мкмоль/с·м², при КС – 800–1000 мкмоль/с·м².

Ключевые слова: картофель, интенсивность света, спектр света, микрорастения, *Solanum tuberosum* L.

Для цитирования: Кульчин Ю.Н., Гафитская И.В., Наконечная О.В., Кожанов С.О., Холин А.С., Субботин Е.П., Субботина Н.И. Влияние спектрального состава и интенсивности света на развитие микрорастений *Solanum tuberosum* L. // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 1. С. 19–30. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825010029>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИАПУ ДВО РАН (тема N FFWF-2024-0004).

Original article

The influence of light quality and intensity on the development of *Solanum tuberosum* L. microplants

Yu. N. Kulchin, I. V. Gafitskaya, O. V. Nakonechnaya, S. O. Kozhanov, A. S. Kholin, E. P. Subbotin, N. I. Subbotina

Yuriy N. Kulchin
Academician of RAS, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
kulchin@iacp.dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8750-4775>

Irina V. Gafitskaya
Leading Engineer
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia
gafitskaya@biosoil.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3100-8668>

Olga V. Nakonechnaya
Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS, Vladivostok, Russia
markelova@biosoil.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9825-277X>

Sergey O. Kozhanov
Junior Researcher
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
kozhanov_57@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-2629-3521>

Aleksandr S. Kholin
Researcher
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
a_kholin@dvo.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9751-5136>

Evgeniy P. Subbotin
Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Leading Researcher
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
s.e.p@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8658-3504>

Natalia I. Subbotina
Junior Researcher
Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia
sale789@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0945-3877>

Abstract. The paper studies the effect of monochromatic light of the red, green and blue spectrum ranges with different levels of irradiation intensity ($30\text{--}1400\text{ }\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$) on the development of potato microplants (*Solanum tuberosum* L., variety Red Scarlett). The highest values of plant height and weight parameters were observed in samples grown under red light, and the lowest in groups illuminated with blue light. Blue light limited stem growth and contributed more to the formation of large leaves. Morphometric parameters of plants grown under green light were higher than those grown under blue light, but lower than the values of samples from sections with red light. The following illumination intensities were optimal for the development of potato microplants: $500\text{--}600\text{ }\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$ under blue and green light, and $800\text{--}1000\text{ }\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$ under red light.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., light intensity, light spectrum, plants growth, microplants

For citation: Kulchin Yu.N., Gafitskaya I.V., Nakonechnaya O.V., Kozhanov S.O., Kholin A.S., Subbotin E.P., Subbotina N.I. The influence of light quality and intensity on the development of *Solanum tuberosum* L. microplants. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(1):19–30. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825010029>

Funding. The research was carried out within the state assignment of IACP FEB RAS (theme FFWF-2024-0004).

Введение

Спектр света и его интенсивность являются важнейшими параметрами при выращивании растений, которые определяют их скорость развития, внешний вид, вкусовые качества и пр. Причем для каждой культуры существуют свои наиболее оптимальные значения характеристик света.

Картофель является одной из самых распространенных и важных сельскохозяйственных культур в мире. Использование качественного семенного материала обуславливает высокую урожайность и здоровье полученных растений. Наиболее успешный урожай возможен благодаря использованию элитных и суперэлитных клубней, которые получают методом апикальных меристем. Этот метод позволяет добиться снижения или полной элиминации вирусов в посевном материале, в результате чего очищенный материал может быть легко воспроизведен методом микроклонального размножения *in vitro* [1].

На сегодня известно большое количество выполненных исследований влияния спектрального состава и интенсивности света на развитие растений картофеля (*Solanum tuberosum* L.). Ранее было показано, что среди моноспектров, как правило, наилучшим

образом развитию растений картофеля способствует красный (КС), синий (СС) и в меньшей степени зеленый (ЗС) свет [2]. Однако наилучшие показатели развития растения картофеля отмечаются при облучении мультиспектральным светом. Так, в работе [3] наибольшему клубнеобразованию среди вариантов облучения с различными соотношениями КС и СС соответствовал вариант с соотношением КС/СС соответственно 30/70. Согласно же работе [4] наилучшим образом развивались растения картофеля сорта Favorita при освещении с соотношением КС/СС 70/30, что говорит о различиях в результатах воздействия света между разными сортами. Между тем в исследовании [5] было установлено, что лучшие результаты по показателю туберизации картофеля сорта Zhongshu 5 демонстрируют растения при облучении светом в пропорциях КС/СС/ЗС соответственно 45/35/20. В этой же работе было отмечено благотворное воздействие света со спектральным составом 65% КС и 35% СС, а также вариант облучения с 100% СС. Однако применение широкополосного светового излучения способствует формированию более крепких растений по сравнению с монохроматическим облучением. Так, исследование микрорастений картофеля сорта Невский выявило неэффективность применения узкополосного спектрального освещения с длинными волнами, а также позволило исследовать реакции микрорастений на разные моноспектры [6]. Проростки оказались слабыми, с мелкими листьями, угнетенными корнями и значительно удлинненными стеблями. Наилучшее воздействие на развитие микрорастений *S. tuberosum* оказал вариант облучения с источником света, имитирующим солнечный свет (Sun Box, SB) [6]. В другом исследовании было выявлено, что наиболее благоприятным для развития растений был спектр, содержащий 63% КС, 21% ЗС и 16% СС [6].

Исследования по изучению влияния интенсивности излучения света показали, что уровень облученности в 230 мкмоль/с·м² обеспечивал наиболее оптимальные значения морфометрических показателей и хорошо развитые корни, что важно для последующей пересадки в грунт. При облучении с уровнем интенсивности 75 мкмоль/с·м² микрорастения характеризовались высоким ростом и наибольшим числом междоузлий, что важно для получения микрочеренков [7, 8]. Интересно отметить, что во всех работах интенсивность облучения представлена в диапазоне 75–414 мкмоль/с·м². В то же время отсутствуют исследования, посвященные развитию растений картофеля при интенсивности света вне данного диапазона. Поэтому целью данной работы явилось изучение развития микрорастений *S. tuberosum* монохроматическим светом при интенсивности облучения в диапазоне 30–1400 мкмоль/с·м².

Материалы и методы

В данном эксперименте для работы использовали экспланты *S. tuberosum* сорта Рэд Скарлетт (рис. 1). Этот сорт является среднеранним по сроку созревания, характеризуется быстрым и интенсивным накоплением урожая. Образцы подготавливали в ФНЦ биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН. Экспланты помещали по одному на поверхность агаризованной питательной среды Мурашиге и Скуга [9], с содержанием 1 мг/л индолилуксусной кислоты (ИУК) и 0,2 мг/л кинетина. Культивирование растений проводили в ИАПУ ДВО РАН при температуре 21±1 °С, влажности воздуха 60±10% и световом режиме 16 ч света и 8 ч темноты, в 6 фитобоксах с разными вариантами светового облучения. В каждой из секций фитобоксов располагали по 14–18 экз.

В экспериментах использовались светодиодные монохромные источники синего (СС, 440 нм), зеленого (ЗС, 520 нм) и красного (КС, 660 нм) света. Формы спектров излучения используемых светильников, а также спектра контрольного облучения представлены на рис. 2. Спектрометрические данные измерений получены с помощью спектрофотометра PG200N.

В проведенных экспериментах группы растений были распределены по секциям фитобоксов с 10 вариантами интенсивности облучения для каждого из цветов, мкмоль/с·м²: 30, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1400. Длительность эксперимента составила 4 недели. Полученные данные обрабатывались с помощью пакета программ Microsoft Office Excel и Statistica.



Рис. 1. Экспланты *Solanum tuberosum* сорта Рэд Скарлетт *in vitro* на начальном этапе культивирования

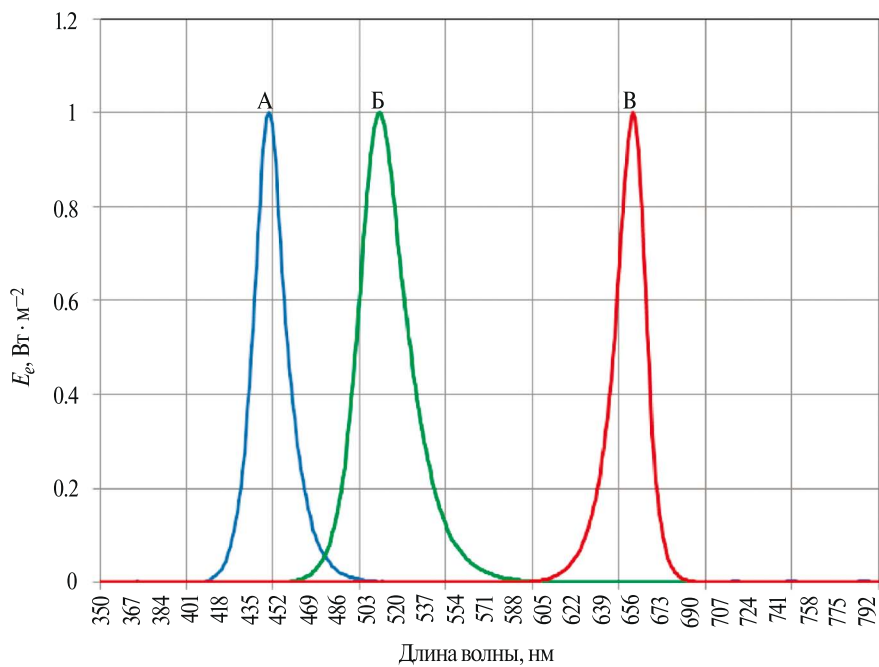


Рис. 2. Спектры излучения светильников синего (А), зеленого (Б) и красного (В) света

Результаты и обсуждение

На рис. 3–6 показаны средние значения высоты и массы растений картофеля при разных спектрах и интенсивности облучения.

Анализируя полученные данные, можно отметить наивысшие показатели высоты и сырой массы растений из секций с КС при интенсивностях облучения 500–1200 мкмоль/с·м². Эти растения были самыми высокими, но также имели и высокие значения массы. О положительном действии КС при культивировании растений говорится во многих работах, например в работе [2]. В то же время в работе [6] было отмечено, что растения картофеля сорта Невский, культивировавшиеся при КС, были слишком вытянуты и имели меньшую массу,

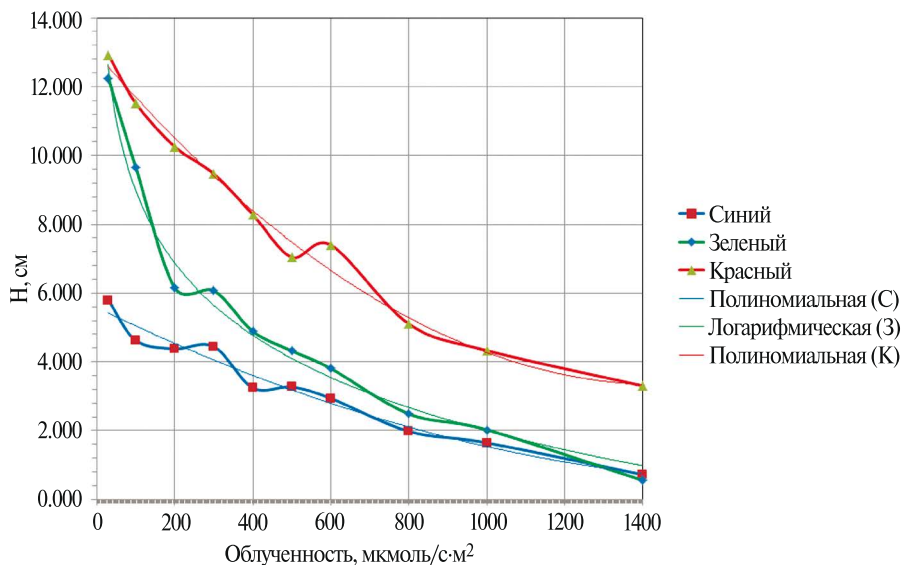


Рис. 3. Сглаженные зависимости высоты растений от величины облученности с линиями тренда при разном спектре

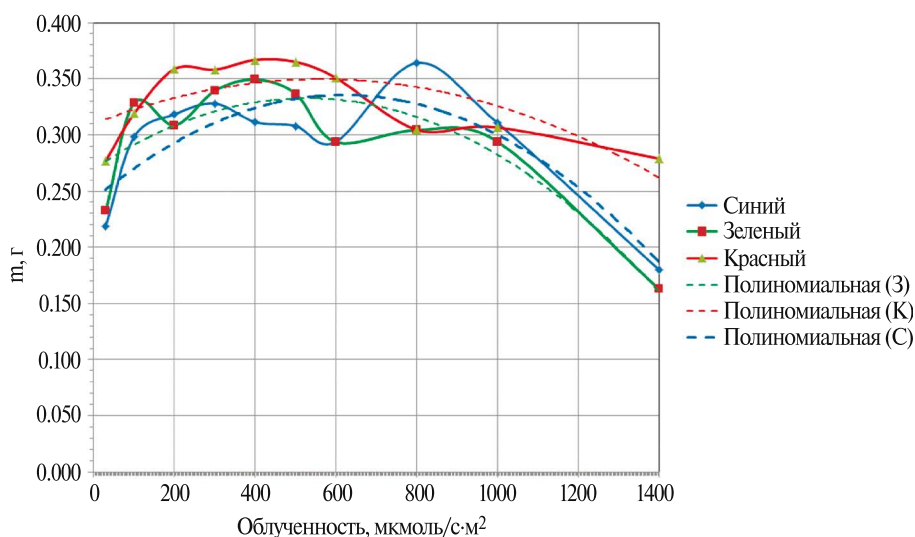


Рис. 4. Сглаженные зависимости для сырой массы надземной части растений от интенсивности облучения при разном спектре с полиномиальными линиями тренда

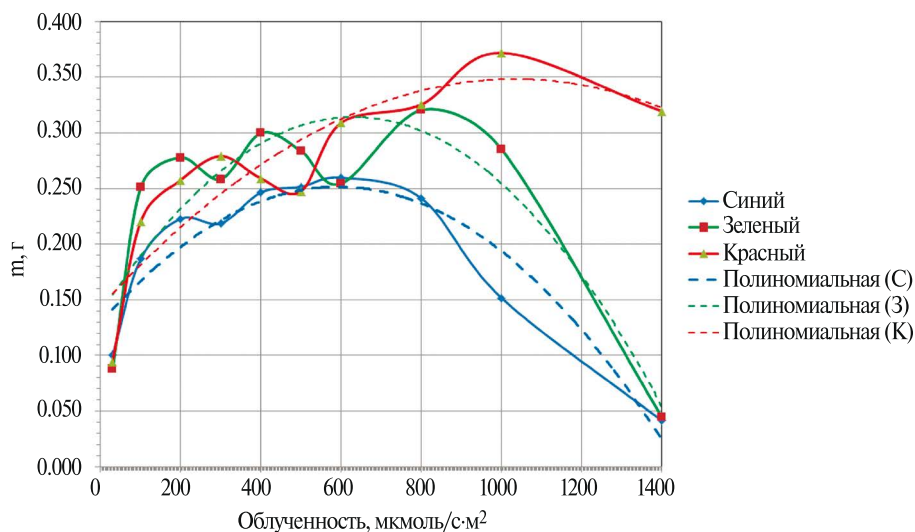


Рис. 5. Сглаженные зависимости для сырой массы корней от интенсивности облучения при разном спектре с полиномиальными линиями тренда

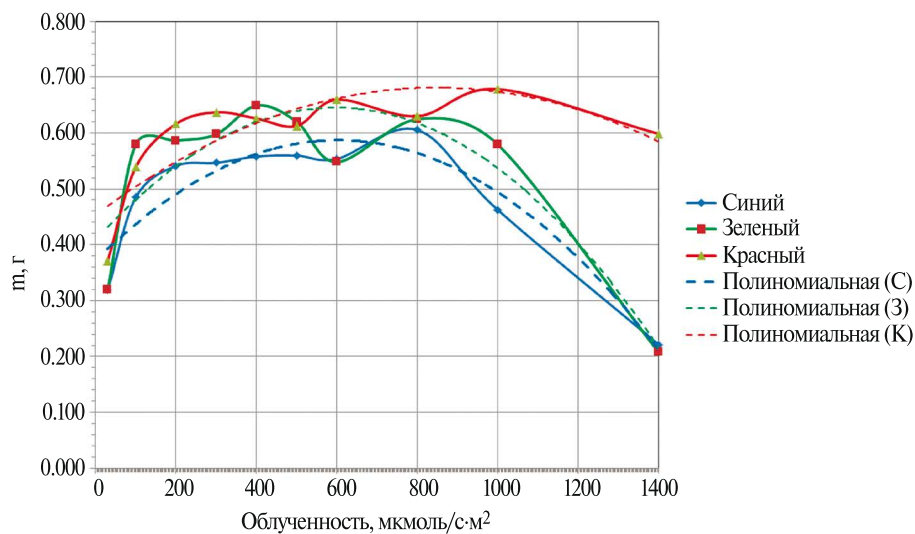


Рис. 6. Сглаженные зависимости для общей сырой массы растений от интенсивности облучения при разном спектре с полиномиальными линиями тренда

чем выращенные при ЗС и СС, и делался вывод, что длинноволновое излучение в меньшей степени способствует их развитию. Однако они очень походили на образцы из текущей работы, облучавшиеся КС минимальной интенсивности, поэтому, возможно, это было связано с недостаточностью интенсивности света, используемой в работе [6] (49 $\text{мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$).

Наиболее низкими показателями относительно растений картофеля в остальных группах характеризовались растения, выращенные при СС. Их масса при всех интенсивностях света была наименьшей, что, по всей видимости, говорит о недостатке в спектре освещения более длинных волн. Своих максимальных значений массы растения, выращенные при СС, достигали при уровнях облученности 300–800 $\text{мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$. С другой стороны, в работах [5, 6] авторы отмечают, что монохроматический синий свет в большей степени способствует развитию растений картофеля, чем КС, что отражается на их массе и более здоровых

крупных листьях [6, 10]. В нашем исследовании растения из групп с синим светом также имели более крупные листья, чем полученные при выращивании при КС, хотя и уступали последним по массе. В исследованиях [2, 4] был сделан вывод о том, что при СС растения картофеля развиваются лучше, чем при ЗС. В работах [6, 10] отмечается превосходство показателей растений из секций с СС над выращенными при ЗС по параметрам массы, размеров и количества листьев, однако культивированные при ЗС растения превосходили их по высоте. В текущей работе образцы из секций с ЗС тоже получились выше тех, что развивались при СС, но также превосходили их и по массе как надземной, так и корневой частей, в результате чего видно, что успешное выращивание растений картофеля возможно и при монохроматическом ЗС.

Эффективное применение ЗС отмечается при выращивании других культур, например салата [11]. В работах по изучению влияния ЗС на развитие растений [12–16] отмечено: в связи с тем что ЗС поглощается листьями растений слабее, чем СС и КС, для более успешного развития требуются более высокие интенсивности света данного диапазона по сравнению с СС и КС. В проведенных экспериментах ярко выраженного подтверждения данному утверждению выявлено не было. Среди вариантов облучения с ЗС максимальные значения параметра массы растений наблюдались при интенсивностях облучения в диапазоне 300–900 мкмоль/с·м², как и при остальных спектрах излучения. Важно отметить, что в нашем эксперименте у микрорастений, культивированных при ЗС, число пожелтевших и высохших листьев у образцов меньше (цифры не представлены) по сравнению с вариантами освещения СС и КС. Это можно объяснить более низким коэффициентом поглощения ЗС листьями растений [17], из-за чего, по-видимому, разрушение хлорофилла в таких условиях происходит в меньшей степени.

Необходимо отметить, что в данной работе наиболее «комфортными» уровнями интенсивности облучения для развития растений при СС и ЗС были 300–800 мкмоль/с·м², а при КС – 300–1000 мкмоль/с·м². При этом во многих работах [2, 3, 5, 8, 18], где исследовалось развитие растений картофеля, авторы использовали освещение с уровнями интенсивности менее 100 мкмоль/с·м², однако растения при этом развивались хорошо. В нашем эксперименте при таких уровнях облученности растениям света было недостаточно, и они испытывали стресс. Это может говорить о специфичности и стрессоустойчивости сорта Рэд Скарлетт, так как в вышеперечисленных исследованиях использовались иные сорта. В работах [7, 8, 19], где авторы изучали зависимость роста растений картофеля и стевии медовой от интенсивности излучения в пределах 75–414 мкмоль/с·м², наиболее подходящими для черенкования были растения, выращенные при 75 мкмоль/с·м², а для пересадки в грунт – при 230 мкмоль/с·м², однако в этих экспериментах брался сорт картофеля, отличный от сорта, используемого в текущей работе. В [20] для диапазона интенсивностей облучения 75–382 мкмоль/с·м² максимальными значениями высоты, массы, количества и размера листьев обладали образцы растений, выращенные при 135,5 мкмоль/с·м². При самых высоких для эксперимента [20] интенсивностях авторы наблюдали снижение рассматриваемых параметров, что согласуется с данными, полученными в настоящей работе.

Из полученных в текущем эксперименте результатов можно выделить три типа реакций микрорастений картофеля сорта Рэд Скарлетт на воздействие света в зависимости от его интенсивности. Первый тип характерен для растений, облучаемых светом малой интенсивности (30–100 мкмоль/с·м²). При данном типе реакции растения испытывают недостаток света, в результате чего наблюдается удлинение стебля, что должно способствовать поглощению большего числа фотонов. В реальных условиях данный эффект помогает растениям избегать тени от своих соседей. В результате такие образцы очень высокие, но имеют небольшие листья, слабо развитые корни, малую общую массу, в основном состоящую из массы надземной части, так как большая часть энергии тратится именно на ее образование. Однако поскольку стебель у таких растений тонкий, а листья малы, масса надземной части у образцов данной группы все равно небольшая сравнительно с другими результатами данного эксперимента.

Второй тип ответной реакции наблюдался у микрорастений, облучавшихся СС (200–800 мкмоль/с·м²), ЗС (200–1000 мкмоль/с·м²) и КС (200–1400 мкмоль/с·м²). Эта группа

растений характеризовалась средними и максимальными значениями высоты, общей сырой массы, размеров листьев, развитыми корнями. Однако в рамках данной группы есть некоторое отличие в показателях растений, из-за чего ее можно разделить на две подгруппы. Первая включает в себя растения, облучавшиеся излучением с уровнями интенсивности 200–500 мкмоль/с·м² при всех трех спектрах. Вторая объединяет образцы из секций с освещением с уровнями интенсивности излучения 500–800 мкмоль/с·м² при СС, 500–1000 мкмоль/с·м² при ЗС и 500–1400 мкмоль/с·м² при КС. В первой подгруппе растения отличаются более высокими значениями массы надземной части, а во второй, наоборот, значения массы корневой части достигают своих максимальных значений. В первой подгруппе образцы в среднем были выше, во второй чуть ниже и при освещении КС и СС имели высохшие нижние листья, что наблюдалось в гораздо меньшей степени при облучении ЗС.

Третий тип реакций был выявлен у микрорастений, культивировавшихся при уровнях интенсивности излучения 800–1400 мкмоль/с·м² при СС, 1000–1400 мкмоль/с·м² при ЗС и свыше 1400 мкмоль/с·м² при КС. Их можно охарактеризовать небольшими значениями высоты, количества и размеров листьев, общей сырой массы. Причем последняя состояла в основном из массы надземной части, листья которой, как правило, являлись высохшими и скрученными, в то время как корневая система практически не развивалась. Данный габитус микрорастений свидетельствует об избытке света, борясь с которым, они используют вышеперечисленные механизмы и в итоге перестают развиваться. В зависимости от спектрального состава света интенсивность, при которой наступает такая реакция растений картофеля, разная. Так, при СС это происходит при интенсивности выше 800 мкмоль/с·м², при ЗС – выше 1000 мкмоль/с·м², а при КС – выше 1400 мкмоль/с·м². Это может быть связано с энергией фотонов разного цвета. Наиболее высокой энергией обладают фотоны синего диапазона длин волн [21], в результате чего при СС деградация показателей растений наступает при более низких интенсивностях света, чем при ЗС. А фотоны ЗС имеют более высокие значения энергии по сравнению с фотонами КС. В итоге при ЗС растения приостанавливают свое развитие при облученности свыше 1000 мкмоль/с·м², в то время как при КС образцы при данном уровне интенсивности имеют «нормальные» значения основных параметров, а деградировать начинают при облученности свыше 1400 мкмоль/с·м².

Основываясь на полученных данных, можно выделить диапазоны интенсивностей для каждого спектра облучения, при которых происходит наиболее гармоничное развитие растений с оптимальными показателями. Так, лучшие показатели при культивировании микрорастений картофеля сорта Рэд Скарлетт получены при СС и ЗС с интенсивностью облучения в диапазоне 500–600 мкмоль/с·м², а при КС – при значениях уровня облученности 800–1000 мкмоль/с·м².

Заключение

Таким образом, исследование развития микрорастений *S. tuberosum*, выращиваемых при облучении монохроматическим светом красного, зеленого и синего диапазонов спектра с различным уровнем интенсивности облучения (30–1400 мкмоль/с·м²), выявило их стрессоустойчивость и возможность развития при высоких интенсивностях освещения. Максимальные значения морфометрических параметров наблюдали у образцов, культивированных при КС, а наименьшие – в группах с освещением СС. Спектр СС ограничивал рост стебля и больше способствовал образованию крупных листьев, что подтвердило ранее представленные результаты. Оптимальными для развития микрорастений являются интенсивности освещения: при СС и ЗС – 500–600 мкмоль/с·м², при КС – 800–1000 мкмоль/с·м².

Полученные результаты помогают лучше понять и оценить вклад каждого из трех исследовавшихся спектральных диапазонов света в развитие растений картофеля, что позволяет правильно подобрать необходимый для конкретной задачи спектральный состав используемого света.

1. Villavicencio G.E., Gámez V.A.J., Arellano M.A., Almeida H.J., Fernández J. Micropropagation in four potato genotypes and selection on vitro plants size as a survival ex vitro establishment // *ActaHortic.* 2007. Vol. 748. P. 223–227. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.748.30>.
2. Rocha P.S.G., de Oliveira R.P., Scivittaro W.B. New light sources for *in vitro* potato micropropagation // *Biosci. J.* 2015. Vol. 31. P. 1312–1318. DOI: 10.14393/BJ-v31n5a2015-26601.
3. Pundir R.K., Pathak A., Upadhyaya D.C., Muthusamy A., Upadhyaya C.P. Red and Blue Light-Emitting Diodes Significantly Improve Tuberization of Potato (L.) // *J. Hort. Res.* 2021. Vol. 29. P. 95–108. <https://doi.org/10.2478/johr-2021-0010>.
4. Jiang L., Wang Z., Jin G., Lu D., Li X. Responses of Favorita Potato Plantlets Cultured *in Vitro* under Fluorescent and Light-Emitting Diode (LED) Light Sources // *Am. J. Potato Res.* 2019. Vol. 96. P. 396–402. <https://doi.org/10.1007/s12230-019-09725-8>.
5. Chen Li-li, Zhang Kai, Gong Xiao-chen, Wang Hao-ying, Gao You-hui, Wang Xi-quan, Zeng Zhao-hai, Hu Yue-gao. Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets *in vitro* and minituber production after transplanting in the greenhouse // *J. Integr. Agric.* 2020. Vol. 19, N1. P. 108–119. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62633-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X).
6. Grishchenko O.V., Subbotin E.P., Gafitskaya I.V., Vereshchagina Y.V., Burkovskaya E.V., Khrolenko Y.A., Grigorochuk V.P., Nakonechnaya O.V., Bulgakov V.P., Kulchin Y.N. Growth of micropropagated *Solanum tuberosum* L. plantlets under artificial solar spectrum and different mono- and polychromatic LED lights // *Hortic. Plant J.* 2022. Vol. 8. N2. P. 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.04.007>.
7. Гафицкая И.В., Наконечная О.В., Грищенко О.В., Журавлев Ю.Н., Субботин Е.П., Кульчин Ю.Н. Интенсивность света как регулятор роста растений картофеля при микроклонировании // Актуальные проблемы картофелеводства: фундаментальные и прикладные аспекты: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 10–13 апреля 2018 г. / отв. ред. М.В. Ефимова. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2018. С. 210–211.
8. Kulchin Y.N., Nakonechnaya O.V., Gafitskaya I.V., Grishchenko O.V., Epifanova T.Y., Orlovskaya I.Y., Zhuravlev Y.N., Subbotin E.P. Plant Morphogenesis under Different Light Intensity // *Defect Diffus.* 2018. Vol. 386. P. 201–206. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.386.201>.
9. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures // *Physiol. Plant.* 1962. Vol. 15, N3. P. 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.
10. Гафицкая И.В., Наконечная О.В., Журавлев Ю.Н., Субботин Е.П., Кульчин Ю.Н. Перспективы использования светодиодного излучения при культивировании *in vitro* растений-регенерантов картофеля // Перспективы фитобиотехнологии для улучшения качества жизни на Севере: сб. материалов III Научно-практической конференции с международным участием и Научной школы по клеточной биотехнологии, 4–8 июня 2018 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018. С. 35–37.
11. Johkan M., Shoji K., Goto F., Hahida S.N., Yoshihara T. Effect of green light wave length and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa* // *Environ. Exp. Bot.* 2012. Vol. 75. P. 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.08.010>.
12. Liu J., van Iersel M.W. Photosynthetic Physiology of Blue, Green, and Red Light: Light Intensity Effects and Underlying Mechanisms // *Front. Plant Sci.* 2021. Vol. 12. P. 619987. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.619987>.
13. Terashima I., Fujita T., Inoue T., Chow W.S., Oguchi R. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves // *Plant Cell Physiol.* 2009. Vol. 50, N4. P. 684–697. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp034>.
14. Frantz J.M., Joly R.J., Mitchell C.A. Intracanopy lighting influences radiation capture, productivity, and leaf senescence in cowpea canopies // *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 2000. Vol. 125, N6. P. 694–701. <https://doi.org/10.21273/JASHS.125.6.694>.
15. Lu N., Maruo T., Johkan M., Hohjo M., Tsukagoshi S., Ito Y., Ichimura T., Shinohara Y. Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density // *Environ. Control Biol.* 2012. Vol. 50, N1. P. 63–74. <https://doi.org/10.2525/ecb.50.63>.
16. Smith H.L., McAusland L., Murchie E.H. Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes // *J. Exp. Bot.* 2017. Vol. 68, N9. P. 2099–2110. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx098>.

17. Kim S.J., Hahn E.J., Hoe J.W., Paek K.Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro* // *Sci. Hortic* (Amsterdam). 2004. Vol. 101, N1/2. P. 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.10.003>.
18. Nakonechnaya O.V., Subbotin E.P., Grishchenko O.V., Gafitskaya I.V., Orlovskaya I.Y., Kholin A.S., Goltsova D.O., Subbotina N.I., Bulgakov V.P., Kulchin Y.N. *In vitro* potato plantlet development under different polychromatic LED spectra and dynamic illumination // *Botanica Pacifica*. 2021. Vol. 10, N1. P. 69–74. DOI: 10.17581/bp.2021.10102.
19. Nakonechnaya O.V., Gafitskaya I.V., Burkovskaya E.V., Khrolenko Y.A., Grishchenko, O.V., Zhuravlev Y.N., Subbotin E.P., Kulchin Y.N. Effect of Light Intensity on the Morphogenesis of *Stevia rebaudiana* under *in vitro* Conditions // *Russ. J. Plant Physiol.* 2019. Vol. 66, N4. P. 656–663. <https://doi.org/10.1134/S1021443719040095>.
20. Субботин Е.П., Гафитская И.В., Наконечная О.В., Журавлев Ю.Н., Кульчин Ю.Н. Влияние искусственного солнечного света на рост и развитие растений-регенерантов *Solanum tuberosum* // *Turczaninowia*. 2018. Т. 21, № 2. С. 32–39.
21. Кульчин Ю.Н., Гольцова Д.О., Субботин Е.П. Регулирующее действие света на растения // *Фотоника*. 2020. Т. 14, № 2. С. 192–212. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.192.210>.

REFERENCES

1. Villavicencio G.E., Gámez V.A.J., Arellano M.A., Almeida H.J., Fernández J. Micropropagation in four potato genotypes and selection on vitroplants size as a survival ex vitro establishment. *Acta Horticulturae (The Hague)*. 2007;748:223–227. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.748.30>.
2. Rocha P.S.G., de Oliveira R.P., Scivittaro W.B. New light sources for *in vitro* potato micropropagation. *Bioscience Journal*. 2015;31:1312–1318. DOI: 10.14393/BJ-v31n5a2015-26601.
3. Pundir R.K., Pathak A., Upadhyaya D.C., Muthusamy A., Upadhyaya C.P. Red and Blue Light-Emitting Diodes Significantly Improve Tuberization of Potato (L.). *Journal of Horticultural Research*. 2021;29:95–108. <https://doi.org/10.2478/johr-2021-0010>.
4. Jiang L., Wang Z., Jin G., Lu D., Li X. Responses of Favorita Potato Plantlets Cultured *in Vitro* under Fluorescent and Light-Emitting Diode (LED) Light Sources. *American Journal of Potato Research*. 2019;96:396–402. <https://doi.org/10.1007/s12230-019-09725-8>.
5. Chen Li-li, Zhang Kai, Gong Xiao-chen, Wang Hao-ying, Gao You-hui, Wang Xi-quan, Zeng Zhao-hai, Hu Yue-gao. Effects of different LEDs light spectrum on the growth, leaf anatomy, and chloroplast ultrastructure of potato plantlets *in vitro* and minituber production after transplanting in the greenhouse. *Journal of Integrative Agriculture*. 2020;19:108–119. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62633-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62633-X).
6. Grishchenko O.V., Subbotin E.P., Gafitskaya I.V., Vereshchagina Y.V., Burkovskaya E.V., Khrolenko Y.A., Grigorчук V.P., Nakonechnaya O.V., Bulgakov V.P., Kulchin Y.N. Growth of micropropagated *Solanum tuberosum* L. plantlets under artificial solar spectrum and different mono- and polychromatic LED lights. *Horticultural Plant Journal*. 2022;8(2):205–214. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.04.007>.
7. Gafitskaya I.V., Nakonechnaya O.V., Grishchenko O.V., Zhuravlev Y.N., Subbotin E.P., Kulchin Y.N. Intensivnost' sveta kak regul'yator rosta rastenii kartofelya pri mikroklonirovanii = [Light intensity as a growth regulator of potato plants in microcloning]. *Aktual'nye problemy kartofeleводства: fundamental'nye i prikladnye aspekty: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*, 10–13 aprelya 2018 g. Tomsk: Tomsk State University Publishing House; 2018. P. 210–211. (In Russ.).
8. Kulchin Y.N., Nakonechnaya O.V., Gafitskaya I.V., Grishchenko O.V., Epifanova T.Y., Orlovskaya I.Y., Zhuravlev Y.N., Subbotin E.P. Plant Morphogenesis under Different Light Intensity. *Defect and Diffusion Forum*. 2018;386:201–206. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.386.201>.
9. Murashige T., Skoog F. A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.
10. Gafitskaya I.V., Nakonechnaya O.V., Zhuravlev Y.N., Subbotin E.P., Kulchin Y.N. Perspektivy ispol'zovaniya svetodiodnogo izlucheniya pri kul'tivirovanii *in vitro* rastenii-regenerantov kartofelya = [Prospects for the use of LED radiation in the *in vitro* cultivation of potato regenerated plants] // *Perspektivy fitobiotehnologii dlya uluchsheniya kachestva zhizni na Severe: sb. materialov III Nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem i Nauchnoi shkoly po kletochnoi biotehnologii*, 4–8 iyunya 2018 g. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2018. P. 35–37. (In Russ.).

11. Johkan M., Shoji K., Goto F., Hahida S.N., Yoshihara T. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*. 2012;75:128–133. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.08.010>.
12. Liu J., van Iersel M.W. Photosynthetic Physiology of Blue, Green and Red Light: Light Intensity Effects and Underlying Mechanisms. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:619987. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.619987>.
13. Terashima I., Fujita T., Inoue T., Chow W.S., Oguchi R. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves. *Plant and Cell Physiology*. 2009;50(4):684–697. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp034>.
14. Frantz J.M., Joly R.J., Mitchell C.A. Intracanopy lighting influences radiation capture, productivity, and leaf senescence in cowpea canopies. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2000;125(6):694–701. <https://doi.org/10.21273/JASHS.125.6.694>.
15. Lu N., Maruo T., Johkan M., Hohjo M., Tsukagoshi S., Ito Y., Ichimura T., Shinohara Y. Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density. *Environmental Control in Biology*. 2012;50(1):63–74. <https://doi.org/10.2525/ecb.50.63>.
16. Smith H.L., McAusland L., Murchie E.H. Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes. *Journal of Experimental Botany*. 2017;68(9):2099–2110. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx098>.
17. Kim S.J., Hahn E.J., Hoe J.W., Paek K.Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro*. *Scientia Horticulturae, Amsterdam*. 2004;101(1/2):143–151. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.10.003>.
18. Nakonechnaya O.V., Subbotin E.P., Grishchenko O.V., Gafitskaya I.V., Orlovskaya I.Y., Kholin A.S., Goltsova D.O., Subbotina N.I., Bulgakov V.P., Kulchin Y.N. *In vitro* potato plantlet development under different polychromatic LED spectra and dynamic illumination. *Botanica Pacifica*. 2021;10(1):69–74. DOI: 10.17581/bp.2021.10102.
19. Nakonechnaya O.V., Gafitskaya I.V., Burkovskaya E.V., Khrolenko Y.A., Grishchenko, O.V., Zhuravlev Y.N., Subbotin E.P., Kulchin Y.N. Effect of Light Intensity on the Morphogenesis of *Stevia rebaudiana* under *in vitro* Conditions. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2019;66(4):656–663. <https://doi.org/10.1134/S1021443719040095>.
20. Subbotin E.P., Gafitskaya I.V., Nakonechnaya O.V., Zhuravlev Y.N., Kulchin Y.N. Vliyanie iskusstvennogo solnechnogo sveta na rost i razvitie rastenii-regenerantov *Solanum tuberosum* = [Effect of artificial sunlight on the growth and development of regenerated *Solanum tuberosum* plants]. *Turczaninowia*. 2018;21(2):32–39. (In Russ.).
21. Kulchin Y.N., Goltsova D.O., Subbotin E.P. Reguliruyushchee deistvie sveta na rasteniya = [Regulating Effect of Light on Plants]. *Photonics Russia*. 2020;14(2):192–212. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.192.210>. (In Russ.).