

УДК 58.035.3/57.084.1:635.21

Влияние искусственного солнечного света на рост и развитие растений-регенерантов *Solanum tuberosum*

Е. П. Субботин¹, И. В. Гафицкая², О. В. Наконечная², Ю. Н. Журавлев², Ю. Н. Кульчин¹

¹ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, ул. Радио, 5, г. Владивосток, 690041, Россия.

E-mail: s.e.p@list.ru

² Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН, пр-т 100 лет Владивостоку, г. Владивосток, 680022, Россия. E-mail: markelova@biosoil.ru

Ключевые слова: интенсивность света, картофель, культура *in vitro*, солнечный спектр, *Solanum tuberosum*.

Аннотация. Для изучения влияния спектрального состава и интенсивности широкополосного светового излучения на рост и развитие растений был использован впервые разработанный авторами светодиодный источник света, спектр излучения которого в диапазоне частот 440–660 нм был близок к спектру излучения Солнца (Sun Box). Эксперименты проводили на растениях-регенерантах картофеля *Solanum tuberosum* L. ‘Рождественский’ и ‘Снегирь’, оздоровленных методом апикальной меристемы и культивируемых в условиях *in vitro*. Для контроля использовали растения, выращенные под люминесцентными лампами. Установлено, что при высокой интенсивности искусственного солнечного спектра (230,1 и 382 мкмоль/с*м²) наблюдается подавление роста, уменьшение количества листьев и сырого веса растений. При использовании максимальной интенсивности (382 мкмоль/с*м²) у растений отмечено формирование дополнительных побегов (два или три побега небольшого размера). При понижении интенсивности излучения до 135,5 мкмоль/с*м², напротив, выявлено достоверное увеличение высоты растений, размеров листа и количества листьев по сравнению с контролем. Данные эксперимента при облученности 74,6 мкмоль/с*м² по высоте растений и количеству листьев наиболее близки к показателям, выявленным у контрольной группы растений, прирост корневой массы выше, чем в контроле. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации режима культивирования растений-регенерантов картофеля *in vitro* и проведении их адаптации к открытому грунту; а также для ускорения роста сельскохозяйственных растений в контролируемых условиях, например, в автономных помещениях кораблей или при выращивании культур в условиях Крайнего Севера.

The influence of artificial sunlight and its intensity on the growth and development of *Solanum tuberosum* regenerants

E. P. Subbotin¹, I. V. Gafitskaya², O. V. Nakonechnaya², Yu. N. Zhuravlev², Yu. N. Kulchin¹

¹ Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Radio st., 5, Vladivostok, 690041, Russia

² Federal Scientific Center of the East Asia Terrestrial Biodiversity, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Avenue 100 let Vladivostoku, 159, Vladivostok, 690022, Russia

Keywords: *in vitro*, light intensity, potato, *Solanum tuberosum*, solar spectrum.

Summary. The light source (Sun Box) was developed by the authors for the first time, and its emission spectrum was in the range of frequency 440–660 nm coincided with the solar spectrum. Its effect and light intensity on the growth and development of plants were studied. The experiments were carried out on regenerating plants of *Solanum*

tuberosum L. ('Rozhdestvenskiy' and 'Snegir' cultivars), cultivated under *in vitro* conditions. Virus-free plantlets obtained by the method of the apical meristem isolation were used. A high intensity of the artificial solar spectrum (230.1 and 382 $\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$) was shown to suppress plant growth, the number of leaves and the green mass of plants were decreased. But additional shoot formation was observed under high levels of irradiance (382 $\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$): two or three small shoots developed on all plantlets in the group. At an intensity of 135.5 $\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$, a significant increase in plant height, leaf size and number of leaves was observed. Irradiance of 74.6 $\mu\text{mol/s}\cdot\text{m}^2$ had no effect on the height of plants and the number of leaves, while the increase in the root mass was found. The data obtained can be used to optimize the regime of cultivation of potato regenerating plants *in vitro* and to adapt them to open ground as well as to accelerate the growth of plants under controlled conditions, for example, in autonomous spaces of ships or in the extreme North conditions.

Введение

Солнечный свет является одним из основных абиотических факторов, влияющих на жизнедеятельность и продуктивность растений. В природных условиях растения редко испытывают недостаток солнечной энергии, который привел бы к полной остановке их роста и развития. Однако для успешного выращивания сельскохозяйственных растений естественного уровня солнечной радиации может быть недостаточно, например, в условиях Севера. Дополнительное освещение требуется и при выращивании растений в защищенном грунте – в теплицах. Поэтому для получения качественного урожая очевидна необходимость применения источников искусственного света для дополнительного освещения и изучения влияния характеристик искусственного освещения на рост и продуктивность сельскохозяйственных растений (Yorio et al., 2001; Ushakova et al., 2016; etc.). Спектральное качество, интенсивность и продолжительность дополнительного освещения могут стать важным фактором оптимизации роста в контролируемых условиях.

Исследования по светокультуре растений с применением фитотронов показали эффективность использования света со спектральными характеристиками в области фотосинтетически активной радиации (ФАР) в диапазоне 380–720 нм, близкими к солнечному спектру. Такие характеристики отмечены у ксеноновых ламп. Для ряда сельскохозяйственных растений, выращенных в условиях фитотрона с ксеноновыми лампами, были получены более высокие урожаи и сокращение вегетационного периода, чем у растений в поле (Protasova, 1987). В связи с высокой ценностью картофеля *Solanum tuberosum* L. как уникальной продовольственной и технической культуры, в последнее время активно проводят исследования по светокультуре различных сортов и оздоровленных микрорастений картофеля. Удобным объектом для исследования влияния

искусственного источника света на рост и продуктивность являются культивируемые *in vitro* быстро растущие растения-регенеранты картофеля (Martirosyan et al., 2008, 2013; Golovatskaya et al., 2013; Kononenko, 2016). Так, при изучении действия низкоэнергетического светодиодного облучения с максимумом в области 625 нм на микроклоны картофеля 'Ранняя роза' было обнаружено увеличение скорости роста растений – высота растений на 15 % превышала контрольные показатели (Martirosyan et al., 2008). Исследование действия светодиодного облучения на ростовые и продукционные процессы оздоровленных растений картофеля 'Невский' показало необходимость присутствия в спектре облучателей всех областей спектра видимого света, а также небольшой доли ультрафиолетового и инфракрасного света для получения максимального урожая (Martirosyan et al., 2013). Изучение влияния коррекции параметров белого света на морфогенез микроклонов картофеля 'Луговской' выявило эффективность дополнительного освещения красным светом, при действии которого был отмечен наибольший прирост сухой массы надземной части растений и увеличение ряда других показателей (Golovatskaya et al., 2013). Применение светодиодного комплекса при подборе оптимальных источников света для производства оздоровленного картофеля показало, что при использовании светодиодных источников высота мини-растений больше, чем в контроле, где использовали люминесцентные лампы, но длина корней меньше; при этом содержание сухого вещества и пигментов при использовании различных источников света существенно не различалось (Kononenko, 2016). Учитывая необходимость повышения урожайности этой ценной сельскохозяйственной культуры, исследования по ускорению ростовых процессов и повышению продуктивности с помощью оптимальных источников освещения являются особенно актуальными.

Различные диапазоны спектра используются растениями для полноценного физиологического развития. Существующие источники искусственного света, за редким исключением, не позволяют воспроизводить солнечный спектр в диапазоне фотосинтетически активной радиации или генерируют похожий спектр, но с пиковыми выбросами излучения на ряде отдельных частот или с низким КПД.

В Центре лазерных технологий Института автоматики и процессов управления ДВО РАН (ЦЛТ ИАПУ ДВО РАН) был разработан и изготовлен светодиодный источник света (Sun Box), в котором спектр излучения в диапазоне частот 440–660 нм совпадал со спектром излучения Солнца (рис. 1) со среднеквадратическим отклонением, не превышающим 11 %.

За пределами указанного диапазона (440–660 нм) интенсивность излучения Sun Box быстро уменьшалась до нуля. В отличие от ксеноновых источников света, излучение которых наиболее близко к солнечному спектру, разработанный Sun Box имеет более высокий КПД, достигающий 30 %, и при этом отсутствуют ярко выраженные пики в спектре излучения. Цель настоящей работы – изучение влияния искусственного солнечного света, генерируемого светодиодами, и интенсивности освещения на рост и развитие

ранних сортов картофеля. В качестве объекта исследования использованы растения-регенеранты картофеля *S. tuberosum*, культивируемые *in vitro*.

Материалы и методы

Экспериментальную работу проводили в помещении для светокультуры лаборатории Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН), сектор микроклонального размножения лесных, сельскохозяйственных и декоративных культур (г. Владивосток). Объекты исследования – оздоровленные растения-регенеранты картофеля *S. tuberosum* 'Рождественский' и 'Снегирь'.

Экспланты помещали на поверхность агаризованной питательной среды Мурасиге и Скуга (Murashige, Scoog, 1962), содержащей 1 мг/л ИУК (индолилуксусная кислота), 0,2 мг/л кинетин. В качестве культуральных сосудов использовали химические пробирки Ф1,5 x 16 см с 6 мл питательной среды. Питательную среду автоклавировали 20 минут при давлении 0,8 атм.

Для моделирования спектра излучения Солнца использовали разработанный в ЦЛТ ИАПУ ДВО РАН светодиодный источник света, в котором спектр излучения в диапазоне частот 440–660 нм совпадал со спектром Солнца со средне-

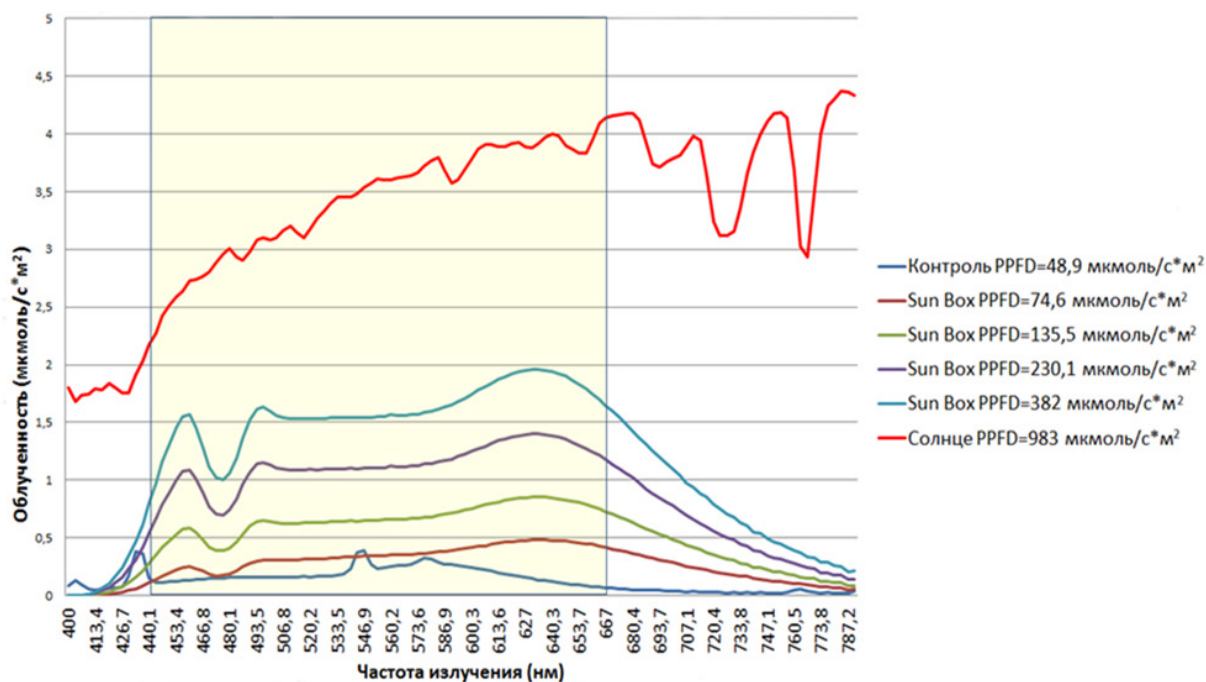


Рис. 1. Спектры искусственного солнечного излучения разной интенсивности в моделируемом диапазоне солнечного излучения: 440–660 нм (выделено желтым фоном). Контроль – освещение люминесцентными лампами OSRAM L 36W/765. Для сравнения приведен спектр Солнца, измеренный во Владивостоке 04.08.2016 г. в 14:41 при наличии легкой облачности.

Таблица

Средние значения биометрических показателей растений-регенерантов картофеля при разной интенсивности искусственного солнечного излучения

Номер опыта	Интенсивность излучения, мкмоль/с*м ²	Размерные признаки, см			Количество листьев	Сырой вес, г	
		Высота растения	Длина листа	Ширина листа		Надземная часть растения	Корни
1.	382	3,24 ± 0,89	0,78 ± 0,29	0,65 ± 0,28	4,75 ± 0,63*	0,15 ± 0,05	0,07 ± 0,02
2.	230,1	1,93 ± 0,81*	0,70 ± 0,19	0,71 ± 0,18	7,50 ± 0,50	0,14 ± 0,03	0,15 ± 0,04
3.	135,5	9,15 ± 0,84**	0,96 ± 0,05**	0,84 ± 0,07	9,00 ± 0,41*	0,29 ± 0,03	0,26 ± 0,03**
4.	74,6	6,70 ± 1,69	0,56 ± 0,08	0,49 ± 0,06	6,25 ± 1,44	0,16 ± 0,05	0,13 ± 0,02
Контроль	48,9	5,33 ± 0,65	0,68 ± 0,06	0,61 ± 0,06	6,86 ± 0,46	0,27 ± 0,11	0,07 ± 0,03

Примеч.: (в таблице приведены средние значения и стандартная ошибка, ** – достоверность $p < 0,01$ по отношению к контролю; * – достоверность $p < 0,05$ по отношению к контролю).

квадратическим отклонением, не превышающим 11 % (рис. 1). Длительность светового периода с соотношением 16/8 ч (день/ночь) задавали с помощью реле времени типа L701A. Температура окружающей среды была + 21... +24 °С, влажность – 70–75 %.

В ходе эксперимента было исследовано четыре варианта различной плотности фотосинтетически активного потока фотонов на м² за одну секунду (PPFD): в опыте 1 пробирки с растениями подвергались максимальному облучению, равному 382 мкмоль/с*м², в опытах 2–4 пробирки помещали в индивидуальные цилиндрические нейтральные светофильтры, которые уменьшали уровень светового потока без изменения спектрального состава света (табл.).

Для измерения спектрального состава света и уровня облученности использован «Спектрофотометр ТКА». Фотодокументацию осуществляли с помощью цифрового фотоаппарата FinePix F80EXR с диафрагмой f/3.3, чувствительностью ISO 200, размером изображения 16:9 и разрешением 4000*2248 (9М). Длительность эксперимента для всех вариантов опыта составляла 35 суток.

В контроле использовали освещение люминесцентными лампами OSRAM L 36W/765, спектр излучения которых приведен на рис. 1, и создающих облученность равную 48,9 мкмоль/с*м². Проводили измерения следующих биометрических показателей растений: высота растения, размеры листа, количество листьев, сырой вес надземной части растений и корней. Полученные данные обрабатывали с использо-

ванием пакета программ Microsoft Office Excel и STATISTICA. Достоверность результатов оценивали по критерию Стьюдента с доверительным уровнем 95 %.

Результаты

При максимальной интенсивности излучения искусственного солнечного спектра (опыт 1, облученность 382 мкмоль/с*м²) отмеченные значения размерных признаков растений, такие как ширина листа и вес корней, были близки к таковым у контрольных растений (табл.). В то же время показатели количества листьев (достоверное отличие) и сырого веса надземной части были ниже на 30 и 46 %, соответственно, чем у контрольной группы. В этом варианте опыта наблюдали формирование дополнительных побегов – у всех растений было два или три побега небольшого размера.

При понижении интенсивности излучения почти в полтора раза до 230,1 мкмоль/с*м² (опыт 2) отмеченные значения высоты и сырого веса растений были в 2,8 и 1,9 раза ниже соответственно, чем показано для контрольных растений (табл.). Размеры листьев не отличались от таковых в опыте 1, но их количество увеличилось почти в два раза. Также отмечено почти двукратное увеличение корневой массы по сравнению с контрольными растениями. Как и в опыте 1, для растений было отмечено формирование двух и трех побегов.

Наилучшие показатели роста и развития растений получены при ФАР облученности 135,5 мкмоль/с*м² (опыт 3) (см. табл.). По сравнению

с контролем темпы прироста длины стеблей превышают контрольные значения в 2–3 раза. Растения при облучении искусственным солнечным светом имеют большие по размеру листья и стебли, корневая система развита интенсивнее. В целом средний сырой вес растений (зеленой и корневой массы) при ФАР облученности 135,5 мкмоль/с*м² составляет 0,55 гр против 0,34 гр в контроле (рис. 2). Почти все морфометрические характеристики эксперимента с высокой достоверностью ($p < 0,01$) отличаются от контрольных растений.

В условиях интенсивности излучения в пять раз меньше максимальной (опыт 4, облученность 74,6 мкмоль/с*м²) все морфометрические показатели растений достоверно не отличались от контрольных (табл.). Данные этого эксперимента по высоте растений и количеству листьев наиболее близки к показателям, выявленным у контрольной группы растений. В то же время вес сырой биомассы в данном эксперименте ниже, чем в группе контроля, а прирост корневой массы, наоборот, выше.

При проведении анализа на достоверность полученных результатов были получены следующие данные. При облученности 135,5 мкмоль/с*м²

растения достоверно выше образцов, выращенных при облученностях 382 мкмоль/с*м² ($p < 0,05$), 230,1 мкмоль/с*м² ($p < 0,01$) и 74,6 мкмоль/с*м² ($p < 0,05$). Длина междоузлий у растений при облученности 230,1 мкмоль/с*м² меньше таковой у образцов с облученностями 135,5 мкмоль/с*м² ($p < 0,01$) и 74,6 мкмоль/с*м² ($p < 0,05$). Листья растений, выращенных при облученности 382 мкмоль/с*м², меньше, чем у образцов при облученности 135,5 мкмоль/с*м² ($p < 0,01$). Длина и ширина листьев растений, выращенных при облученности 135,5 мкмоль/с*м², больше таковых параметров у растений, выращенных с облученностью 74,6 мкмоль/с*м² ($p < 0,01$). Сырой вес корней у картофеля в эксперименте при облученности 135,5 мкмоль/с*м² выше, чем у растений при облученностях 382, 230,1 и 74,6 мкмоль/с*м² ($p < 0,05$).

Обсуждение

Интенсивность света, как и его спектральный состав, является сильным морфогенетическим фактором, регулирующим ростовые реакции растения (Protasova, 1987). Влияние света на рост и развитие растений неоднородно, свет стимулирует прорастание семян и рас-

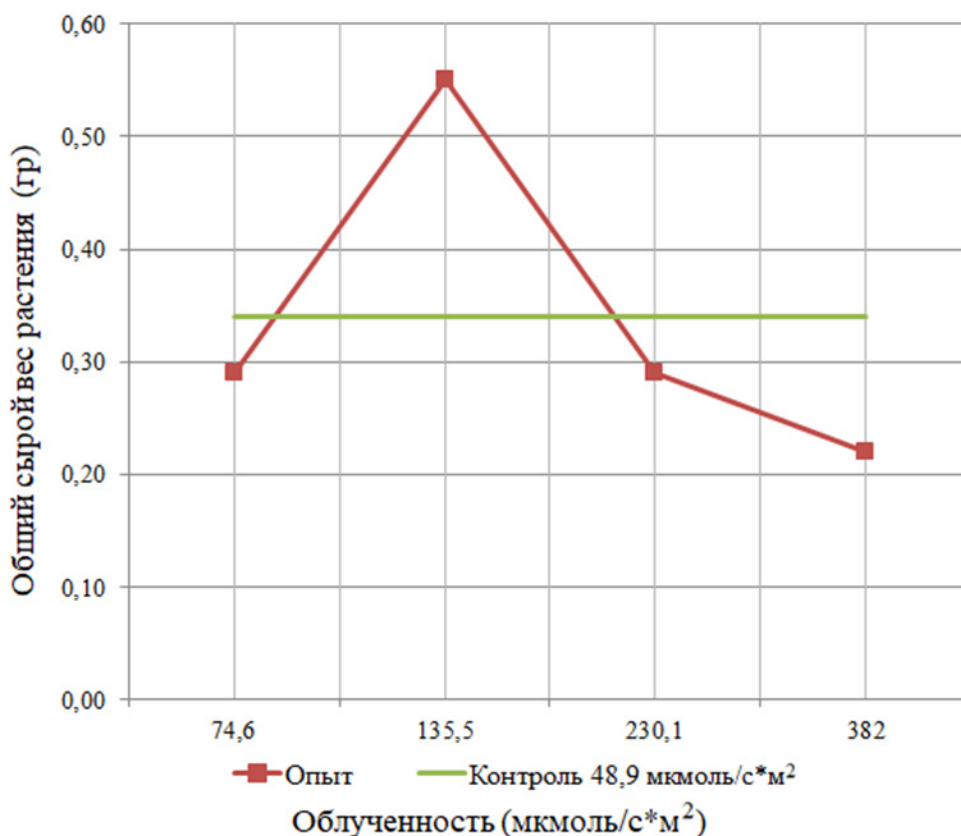


Рис. 2. Зависимость общего сырого веса растения от облученности на 35-е сутки эксперимента.

тяжение листа, в то же время ингибирует рост стебля, вызывает фототропизм и другие реакции (Briggs, 1993; Karnachuk, Golovatskaya, 1998). В нашей работе наблюдали ингибирующее влияние света высоких интенсивностей на развитие стебля (опыты 1 и 2), а также усиление побегообразования. При снижении облученности с 382 мкмоль/с*м² (опыт 1) до 135,5 мкмоль/с*м² (опыт 3), вероятно, происходит изменение скорости фотосинтеза, увеличивается содержание фитогормонов и флавоноидных соединений, которые приводят к интенсивному росту растения и увеличению биомассы не только надземной части, но и корневой системы. Эти данные хорошо согласуются с данными, полученными Протасовой (Protasova, 1987) и другими авторами (Leong, Anderson, 1984; Malyarovskaya et al., 2013). Но в отличие от растений, выращенных в грунте (эксперименты Протасовой), у ранних сортов картофеля, культивируемых в условиях *in vitro*, для оптимального развития требуется на порядок меньшая облученность. Так, например, увеличение сухой биомассы и площади листа при сниженном уровне ультрафиолетового облучения было установлено при изучении регуляции роста растений капусты (*Brassica oleracea* L. 'Точка') с помощью коррекции солнечного излучения (Golovatskaya et al., 2012). Для исследованных ранее сельскохозяйственных растений было показано торможение ростовых процессов светом высоких интенсивностей (свыше 250 Вт/м² ФАР), как у светолюбивых (подсолнечник – *Helianthus annuus* L., редис – *Raphanus sativus* L. var. *minor*), так и у тенелюбивых растений (салат – *Lactuca saliva* L.), а также установлены оптимальные диапазоны интенсивности, при которых наблюдается максимальное накопление биомассы в единицу времени: для светолюбивых растений это диапазон ФАР 150–220 Вт/м², для салата около 200 Вт/м²; важно отметить, что при оптимальной интенсивности света процессы роста и фотосинтеза были хорошо сбалансированы (Protasova, 1987). Картофель относится к светолюбивым растениям; при выращивании растений картофеля 'Прикульский ранний' в аэропонной установке под лампами накаливания с иодным циклом было показано, что оптимальной была интенсивность света в области ФАР 200 ± 30 Вт/м² (Lebedeva et al., 1976), что соответствует 800–1000 мкмоль/с*м² в области фотосинтетически активной радиации (Martirosyan et al., 2013). В нашем случае при выращивании картофеля в условиях *in vitro* облученности 382 мкмоль/с*м²

соответствует значению 88,0 Вт/м²; 230,1 мкмоль/с*м² – 49 Вт/м²; 135,5 мкмоль/с*м² – 28,8 Вт/м²; 74,6 мкмоль/с*м² – 15,9 Вт/м², из которых оптимальной является облученность около 135,5 мкмоль/с*м² или 28,8 Вт/м², что значительно меньше значений, полученных в работах Протасовой на растениях, выращиваемых в почве или гидропонике, но, тем не менее, это хорошо согласуется с рекомендациями для использования технологии культуры тканей (Ahloowalia et al., 2004).

Полученные результаты показали, что при интенсивности излучения 135,5 мкмоль/с*м², наряду с увеличением размеров растения и количества листьев, происходит четырехкратное увеличение сырого веса корней по сравнению с обычными условиями культивирования, используемыми в светокультуре растений. Доля вклада корня в биомассу всего растения при этих условиях составляет 47,3 %, в то время как в контроле – 20,6 %. Увеличение массы корней при оптимальном освещении указывает на увеличение активной поглощающей поверхности корня и, соответственно, увеличение потока поглощенных питательных веществ, дающего преимущество в росте надземной части растения, по сравнению с другими вариантами опыта. Изменения корневой системы были отмечены при изучении коррекции освещения микроклонов картофеля 'Луговской', когда использование белого и красного света приводило к увеличению объема корней и, как следствие, увеличению побега (Golovatskaya et al., 2013).

Сбалансированность процессов роста и фотосинтеза имеет решающее значение для получения высокой продуктивности растений. Известно, что при неблагоприятных световых условиях у растений включаются компенсаторные механизмы, восполняющие недостаток одного параметра другим: при низкой интенсивности света невысокий фотосинтез частично компенсируется увеличением площади листьев, а при высокой интенсивности света меньшая листовая поверхность компенсируется повышенной скоростью ассимиляции углекислого газа (Protasova, 1987). Для всестороннего анализа действия искусственного солнечного света на растения-регенеранты картофеля необходимо дальнейшее изучение физиологических процессов у опытных растений, включающее оценку параметров фотосинтеза.

Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что выращивание

растений-регенерантов *Solanum tuberosum* при искусственном освещении со спектром излучения, близким к спектру солнца в диапазоне частот 440–660 нм, и облученностью 135,5 мкмоль/с*м² увеличивает активность процессов роста, способствует повышению массы корней и интенсивному развитию надземной части, что в перспективе, вероятно, позволит сократить сроки вегетации, ускорить столонообразование и повысить урожайность безвирусных мини-клубней. Для определения биологической эффективности источников искусственного солнечного света со спектром, близким к солнечному спек-

тру, необходимо продолжить исследование влияния условий освещения на процессы роста и фотосинтеза растений-регенерантов картофеля на разных этапах их развития. Некоторое снижение освещенности в начальном периоде развития может привести к относительному увеличению площади листьев и к более эффективному поглощению света в дальнейшем, что важно для расчетов экономичности.

Благодарности

Работа поддержана грантом ДВО РАН «Дальний Восток» № 18-5-079.

REFERENCES / ЛИТЕРАТУРА

- Ahloowalia B. S., Prakash J., Savangikar, V. A., Savangikar C.** 2004. Plant tissue culture. In: *Low cost options for tissue culture technology in developing countries: Proceedings of a Technical Meeting organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in Vienna (26–30 August, 2004)*. IAEA in Austria, Vienna, 3–10 pp. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1384_web.pdf.
- Briggs W. R.** 1993. New light on stem growth. *Nature* 366: 110–111. DOI: 10.1038/366110a0.
- Golovatskaya I. F., Dorofeyev V. Yu., Medvedeva Yu. V., Nikiforov P. E., Karnachuk R. A.** 2013. Optimization of illumination conditions in cultivation process of *Solanum tuberosum* L. cv. Lugovskoy microcuttings *in vitro*. *Tomsk State University Journal of Biology* 4(24): 133–144 [In Russian]. (Головацкая И. Ф., Дорофеев В. Ю., Медведева Ю. В., Нукифоров П. Е., Карначук Р. А. Оптимизация условий освещения при культивировании микроклонов *Solanum tuberosum* L. сорта Луговской *in vitro* // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология, 2013. Т. 4(24). С. 133–144).
- Golovatskaya I. F., Minich A. S., Minich I. B., Bolshakova M. A.** 2012. Regulation and development of *Brassica oleracea* L. plants growth with the help of sunlight correction. *Tomsk State University Journal of Biology* 2(18): 151–165 [In Russian]. (Головацкая И. Ф., Минич А. С., Минич И. Б., Большакова М. А. Регуляция роста и развития растений *Brassica oleracea* L. с помощью коррекции солнечного излучения // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология, 2012. Т. 2(18). С. 151–165).
- Karnachuk R. A., Golovatskaya I. F.** 1998. Hormonal status, growth and photosynthesis of plants grown on light of different spectral composition. *Russ. J. Plant Physiol.* 45(6): 925–934 [In Russian]. (Карначук Р. А., Головацкая И. Ф. Гормональный статус, рост и фотосинтез растений, выращенных на свету разного спектрального состава // Физиология растений, 1998. Т. 45, № 6. С. 925–934).
- Kononenko A. N.** 2016. Influence of various light sources on the development of potato mini plants under conditions of light culture. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [News of the St. Petersburg State Agrarian University]* 45: 50–56 [In Russian]. (Конonenко А. Н. Влияние различных источников света на развитие мини-растений картофеля в условиях светокультуры // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета, 2016. № 45. С. 50–56).
- Lebedeva E. V., Simonov V. M., Vil'yams M. V.** 1976. Technology and perspective of potato cultivation in artificial environment conditions. In: *Principy upravleniya produkcionnymi processami v agroekosistemakh [Principles of Productive Processes Management in Agroecosystems]*. Nauka, Moscow, 144–152 pp. [In Russian]. (Лебедева Е. В., Симонов В. М., Вильямс М. В. Технология и перспектива культивирования картофеля в искусственных условиях среды // Принципы управления продукционными процессами в агроэкосистемах. М.: Наука, 1976. С. 144–152).
- Leong T. Y., Anderson J. M.** 1984. Adaptation of the thylakoid membranes of pea chloroplasts to light intensities. II. Regulation of electron transport capacities, electron carriers, coupling factor (CF₁) activity and rates of photosynthesis. *Photosynth. Res.* 5(2): 117–128. DOI: 10.1007/BF00028525.
- Malyarovskaya V. I., Sokolov R. N., Samarina L. S.** 2013. Influence of the light spectral composition on the *Lilium caucasicum* growth and development *in vitro*. *Politematicheskij setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University]* 94, 10: 1–11 [In Russian]. (Малыаровская В. И., Коломиец Т. М., Соколов Р. Н., Самарина Л. С. Влияние спектрального состава света на рост и развитие *Lilium caucasicum* в условиях культуры *in vitro* // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2013. Т. 94, № 10. С. 1–11).

Martirosyan Yu. Ts., Kosobryukhov A. A., Kreslavskii V. D., Dilovarova T. A., Melik-Sarkisov O. S., Letunova S. V., Kharchenko P. N. 2008. Photosynthesis and productivity of potato plants growing in the conditions of aeroponics with additional exposure to light diode. *Selskokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]* 3: 102–105 [In Russian]. (**Мартиросян Ю. Ц., Кособрюхов А. А., Креславский В. Д., Диловарова Т. А., Мелик-Саркисов О. С., Летунова С. В., Харченко П. Н.** Фотосинтез и рост растений картофеля при выращивании в условиях аэропоники с дополнительным облучением светодиодами // *Сельскохозяйственная биология*, 2008. № 3. С. 102–105).

Martirosyan Yu. Ts., Polyakova M. N., Dilovarova T. A., Kosobryukhov A. A. 2013. Photosynthesis and productivity of potato plants under different spectral irradiation. *Selskokhozyaystvennaya biologiya [Agricultural Biology]* 1: 811–822 [In Russian]. (**Мартиросян Ю. Ц., Полякова М. Н., Диловарова Т. А., Кособрюхов А. А.** Фотосинтез и продуктивность растений картофеля в условиях различного спектрального облучения // *Сельскохозяйственная биология*, 2013. № 1. С. 811–822).

Murashige T., Skoog F. 1962. A revised medium for rapid growth and bio-assays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.* 15: 473–497.

Protasova N. N. 1987. Growing plants under artificial light as a means for evaluating potential productivity. *Russ. J. Plant Physiol.* 34(4): 812–822 [In Russian]. (**Протасова Н. Н.** Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // *Физиология растений*, 1987. Т. 34, № 4. С. 812–822).

Ushakova S. A., Grigorashchenko Ya. A., Shikhov V. N., Chernov V. E., Tikhomirov A. A. 2016. Light emission effect of led irradiators on growth and development of soy of different varieties in the conditions of intensive light culture. *Vestnik KrasGAU [The Bulletin of KrasGAU]* 7: 28–35 [In Russian]. (**Ушакова С. А., Григорашченко Я. А., Шихов В. Н., Чернов В. Е., Тихомиров А. А.** 2016. Влияние спектра излучения светодиодных облучателей на рост и развитие различных сортов растений сои в условиях интенсивной светокультуры // *Вестник КрасГАУ*, 2016. № 7. С. 28–35).

Yorio N. C., Goins G. D., Kagie H. R., Wheeler R. M., Sager J. C. 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red lightemitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *Hort Science* 36(2): 380–383.