

Уровень освещенности как регулятор роста микрорастений картофеля *in vitro*

© 2025. В. Ю. Ступко¹✉, С. Ю. Луговцова¹, Н. С. Помыткин¹,
К. В. Кукушкина¹, А. И. Черемисин²

¹ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, г. Красноярск, Российская Федерация,

²ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», г. Омск, Российская Федерация

Цель исследований – определить влияние увеличения плотности потока фотосинтетически активных фотонов (ППФАФ) со 100 до 200 мкмоль/м²с на рост, развитие и морфогенез *in vitro* одноузловых микрочеренков картофеля сортов Краса Мещеры, Садон (ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха), Былина Сибири, Иртыш (Омский АНЦ). Увеличение ППФАФ сопровождалось укорачиванием побегов на 12–32 % в зависимости от сорта и уменьшением числа междоузлий у всех сортов минимум на 10 %. Наблюдали перераспределение накопления биомассы в сторону корневой системы у всех сортов, кроме Иртыш. Сорта селекции ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха формировали более плотные листья. У сорта Иртыш отмечено снижение содержания хлорофиллов и каротиноидов, у сорта Краса Мещеры – увеличение. Площадь четвертого листа была максимальной у этих сортов при 200 мкмоль/м²с. Увеличивалась устойчивость цепи передачи электронов фотосистемы 2 к высокой ППФАФ, что видно из роста параметров флуоресценции хлорофилла А: максимальной скорости транспорта электронов и минимальной насыщающей интенсивности света, а также динамики быстрых световых кривых фотохимического тушения флуоресценции. Только у сорта Краса Мещеры наблюдали снижение F_v/F_m . К сортоспецифичным реакциям также отнесены: сокращение доли растений с ветвлением у сорта Иртыш; увеличение частоты образования каллусных глобул в корневой зоне и эдем на листьях и побегах у сортов омской селекции; формирование микроклубней в пазухе инициирующего черенка у сорта Краса Мещеры. Таким образом, увеличение ППФАФ до 200 мкмоль/м²с у большинства исследованных сортов приводит к формированию более подходящих растений для высадки в грунт или условия аэропонных/гидропонных установок: невысокие, с хорошо развитой корневой системой, большей площадью листьев и адаптированностью фотосистем к высокой интенсивности света. Исключением является сорт Краса Мещеры, в том числе из-за чрезмерно коротких побегов (от 2 до 36 мм). Для микроклонального размножения более подходящим является уровень ППФАФ 100 мкмоль/м²с, за исключением сорта Иртыш из-за увеличивающейся в этих условиях частоты ветвления.

Ключевые слова: микроклональное размножение, *Solanum tuberosum*, культура межузловых черенков, освещенность, быстрые световые кривые, пигменты фотосинтеза

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (тема № 123071800021-5).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку данной работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ступко В. Ю., Луговцова С. Ю., Помыткин Н. С., Кукушкина К. В., Черемисин А. И. Уровень освещенности как регулятор роста микрорастений картофеля *in vitro*. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(5):1026–1037. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.5.1026-1037>

Поступила: 15.05.2025

Принята к публикации: 25.09.2025

Опубликована онлайн: 31.10.2025

Illumination intensity as a growth regulator for potato microplants *in vitro*

© 2025. Valentina Yu. Stupko✉, Svetlana Yu. Lugovtsova¹,
Nikolay S. Pomytkin¹, Kristina V. Kukushkina¹, Aleksandr I. Cheremisin²

¹Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Krasnoyarsk, Russian Federation

²Omsk Agricultural Scientific Center, Omsk, Russian Federation

The aim of the study is the determination of the effect of increasing the photosynthetic photon flux density (PPFD) from 100 to 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ on the *in vitro* growth, development and morphogenesis of single-node cuttings of potatoes of different cultivars. The following cultivars were involved into the investigation: 'Krasa Meshchery', 'Sadon' (Lorkh Federal Research Center of Potato), 'Bylina Sibiri', 'Irtysh' (Omsk Agricultural Scientific Center). The increase in PPFD was accompanied by a shortening of shoots by 12–32 %, depending on the cultivar, and a decrease in the number of internodes for all varieties by at least 10 %. A redistribution of biomass accumulation towards the root system was observed for all cultivars except the 'Irtysh' cultivar. The cultivars bred by the Lorkh Federal Research Center of Potato formed firm leaves. The 'Irtysh' cultivar showed

a decrease in the content of chlorophylls and carotenoids, while the 'Krasa Meshchery' cultivar showed an increase. The area of the 4th leaf of these cultivars was maximum at 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. The stability of the electron transport chain of photosystem 2 to high PPFD increased, which is evident from the growth of chlorophyll A fluorescence parameters: maximum electron transport rate and minimum saturating light intensity, as well as the dynamics of rapid light curves of photochemical fluorescence quenching. Only the 'Krasa Meshchery' cultivar showed a decrease in Fv/Fm. Cultivar-specific reactions also included: a decrease in the proportion of plants with bushiness of the 'Irtys' cultivar; an increase in the frequency of callus globule formation in the root zone and edema on leaves and shoots of Omsk-bred cultivars; and the formation of microtubers in the axil of the initiating cutting of the 'Krasa Meshchery' cultivar. Thus, increasing the PPFD to 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ leads to the formation, for most of the studied cultivars, of plants that are more suitable for planting in soil or aeroponic/hydroponic conditions: low, with a well-developed root system, a larger leaf area and photosystems adapted to high light intensity. The exception is the cultivar 'Krasa Meshchery' due to the excessively short shoots (from 2 to 36 mm). For micropropagation, PPFD of 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ is more suitable, with the exception of the cultivar 'Irtys' due to the frequency of bushiness increasing under these conditions.

Keywords: micropropagation, *Solanum tuberosum*, nodal cuttings culture, irradiance, rapid light curves, photosynthetic pigments

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" (theme no. 123071800021-5).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citations: Stupko V. Yu., Lugovtsova S. Yu., Neshumaeva N. A., Pomytkin N. S., Kukushkina K. V., Cheremisin A. I. Illumination intensity as a growth regulator for potato microplants *in vitro*. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(5):1026–1037. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.5.1026-1037>

Received: 15.05.2025

Accepted for publication: 25.09.2025

Published online: 31.10.2025

Микроклональное размножение картофеля проводится с использованием богатых питательных сред, где около 60 % биомассы накапливается за счёт метаболизма сахаров [1], поступающих извне. Однако характеристики освещения остаются важным фактором в развитии микроклонов и эффективности тиражирования [2].

Работы в области микроклонального размножения картофеля, как и других культур, зачастую проводятся при малых уровнях плотности потока фотосинтетически активных фотонов (ППФАФ), не превышающих 100 $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$ [3, 4, 5], либо близких к точке компенсации [6, 7, 8], определенной в работе [9] как 50 $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$. Увеличение ППФАФ до 100 $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$ связывают с увеличением площади листьев, их числа, а также темпов накопления биомассы [5], в то время как дальнейшее повышение интенсивности освещения – с уменьшением высоты растений [10]. Последний эффект, однако, по данным [11], видо- и сортоспецифичен, и увеличение ППФАФ со 135 до 230 $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$ может вызывать как укорачивание побегов, так и их удлинение. Реакция микрорастений на качество освещения в зависимости от сорта, по данным Т. Н. Лисиной с соавт. [12], показана во многих исследованиях. Вопрос об оптимальной ППФАФ для микроклонального размножения картофеля широко исследуется и данные, полученные на разных сортах и с использованием различных источников света, сильно разнятся [13]. В свою очередь, соотношение морфологических изменений с процессами фотосинтеза и накопления основных пигментов проводились в единичных

работах на культурах микроклонов [14, 15, 16]. В отношении одноузловых черенков картофеля исследование газообмена при различных уровнях освещенности, вплоть до 120 $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$, описано в работе Ю. Китая с соавт. (Y. Kitaya et al., 1995 г.) [17].

Цель исследования – определить реакции ряда новых сортов картофеля на уровень освещенности при культивировании одноузловых черенков *in vitro*.

Научная новизна – проведена комплексная оценка влияния уровня освещенности на морфометрические параметры микрорастений, накопление фотосинтетических пигментов и процессы фотосинтеза новых сортов картофеля *in vitro*.

Материал и методы. Объектом исследования служила культура одноузловых черенков картофеля сортов Краса Мещеры, Садон (селекция ФГБНУ ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха), предоставленных Красноярским ГАУ, а также Былина Сибири, Иртыш (селекция Омского АНЦ), предоставленных Омским АНЦ в рамках договора о научном сотрудничестве №ОА-1 от 17.04.2024. Культивирование проводили на безгормональной среде Мурасиге-Скуга при 16-часовом дне и температуре 22–25 °С днем и 18–22 °С ночью при ППФАФ 100 или 200 $\mu\text{моль}/\text{м}^2\text{с}$ в закупоренных фольгированными колпачками пробирках П-2-16-150, размещенных в штативах ШЛПП-40 (высота штатива 75 мм) по 40 штук в каждом (биологическая повторность трехкратная, 40 растений каждого сорта в каждом из опытов). В качестве

источников света использовали лампы DS-FITO A 75 («Диод Систем», Россия) с комбинированным, приближенным к солнечному спектром (440-460 нм – 17 %; 640 нм – 79 %; 730 нм – 4 %). Уровень ППФАФ контролировали спектрофотометром ТКА-Спектр (НТП «ТКА», Россия) на уровне верхней планки штатива.

После трех недель культивирования фиксировали ряд параметров листьев. Площадь измеряли в программе AreaS 2.1 (А. Пермяков, Самарская государственная сельскохозяйственная академия). Содержание хлорофиллов *a* ($C_{ХлА}$), *b* ($C_{ХлВ}$) и каротиноидов ($C_{Кар}$) определяли в листьях над верхней планкой штатива по методике [18] в спиртовых вытяжках согласно формулам:

$$C_{ХлА} = 13,96D_{665} - 5,19D_{649}, \quad (1)$$

$$C_{ХлВ} = 27,43D_{649} - 8,12D_{665}, \quad (2)$$

$$C_{Кар} = \frac{(1000D_{470} - 2,13C_{ХлА} - 97,64C_{ХлВ})}{209}, \quad (3)$$

где C – концентрация пигмента, мкг/мл 95%-го этанола; D_{665} , D_{649} , D_{470} – оптическая плотность экстракта на соответствующей длине волны, измеренная на спектрофотометре ПЭ-5400ВИ («Экротех», Россия).

Параметры флуоресценции хлорофилла *a* (ФХ) трёх листьев над верхней планкой штатива (незатененных колпачками или планкой штатива) фиксировали в режиме записи быстрой световой кривой (БСК) фотосинтеза (5–7 растений каждого сорта в каждом из условий) с использованием ПАМ-флуориметра (Junior PAM, Walz, Германия) после темновой адаптации, которую проводили в закрытых пробирках не менее 1 часа. Расчет параметров БСК: максимального квантового выхода ФС2 (F_v/F_m), коэффициента фотохимического тушения флуоресценции при условии сцепки антенн ФС2 (qP) осуществляли в программе WinControl-3 (Walz, Германия). Максимальную скорость транспорта электронов ($СТЭ_{\max}$) через фотосистему 2 (ФС2) и минимальную насыщающую интенсивность светового потока E_k рассчитывали после подгонки моделей согласно [19].

Сухой вес органов микрорастений определяли после высушивания при 50 °С в течение 5 часов до достижения постоянного веса.

Анализ данных проводили с использованием пакета R 4.0.4 в среде разработки RStudio 2024.12.0 (2009-2025 Posit Software, PBC). Соответствие распределения данных нормальному оценивали тестом Шапиро-Уилкса, равенство дисперсий – по критерию Левина. Достоверность различий между усло-

виями по морфометрическим параметрам и параметрам ФХ микрорастений определяли, в зависимости от результатов анализа распределения, с использованием *t*-критерия Стьюдента или теста Манна-Уитни. Частотный анализ проводили с использованием точного критерия Фишера.

Результаты и их обсуждение. Увеличение уровня ППФАФ со 100 до 200 мкмоль/м²с приводило к уменьшению высоты микрорастений и количества междоузлий у всех исследованных сортов (табл. 1). Эти данные согласуются с полученными в работах [5, 10, 20]. У сорта Садон длина сократилась на 32 %, Былина Сибири – на 26 %, Иртыш – на 12 %. Наименьшую высоту при 200 мкмоль/м²с имели микрорастения сорта Краса Мещеры – 36,00 мм. Все без исключения растения образовывали корни.

У сорта Краса Мещеры отмечено формирование утолщения, схожего с микроклубнем, в пазушной почке иницирующего черенка. Зачастую побег формировался на этом «микроклубне». Такое явление наблюдали с частотой до 60 % при уровне освещенности 200 мкмоль/м²с. Как результат, 25 % (Q_1) растений к концу цикла культивирования имели всего по одному сформированному *de novo* междоузлию. При 100 мкмоль/м²с такое утолщение фиксировали со статистически значимо меньшей частотой в 20 % ($F = 7,93$, $p < 0,01$). У сорта Садон имелись единичные растения с подобными структурами при 100 мкмоль фотонов/м²с; в условиях высокой освещенности утолщений у основания черенка данный сорт не образовывал.

Сорта омской селекции выделялись наличием каллусных наростов на корневой системе. У сорта Былина Сибири к 3-й неделе частота этого явления не отличалась между вариантами опыта, достигая 49–59 %. Каллус был плотным его сухая масса у этого сорта при 100 мкмоль/м²с превышала данные при 200 мкмоль/м²с в 2 раза. Однако частота формирования каллуса ко 2-й неделе была выше при 200 мкмоль/м²с. Образование каллусной ткани в области корней упоминается в работе [21] при добавлении в среду НУК, в том числе в сочетании с БАП как индукторов микроклубнеобразования. Не удалось найти упоминания такого явления в работах, проводимых на безгормональных средах, возможно из-за того, что в случае микроклонального размножения данным явлением можно пренебречь. В своей работе ранее мы также наблюдали образование таких структур у отдельных сортов (данные не приводятся). Вероятно, это является сортоспецифичной реакцией на условия *in vitro*. Необходимо учитывать,

Таблица 1 – Морфометрические параметры микрорастений картофеля при различном уровне освещенности /
Table 1 – Morphometric parameters of potato microplants under different illumination intensity

Сорт / Cultivar	ППФАФ, мкмоль/м ² с / PPFD μmol/m ² s	Число междоузлий, шт./раст. / Internode quantity, pcs/plant (Me[25/75])	Длина побега, мм / Stem length, mm Me[25/75]	Доля микрорастений с каллусообразованием в области корневой системы, % / Part of plants with calluses on roots, %		Сухой вес каллуса, г/растение (среднее±ст. откл.) / Callus dry weight, g/plant (Mean±SE)	Частота ветвления, отн. ед. / Bushiness frequency, r.u.		Доля микро- растений с эдемой, % / Part of plants with edema, %
				14 сут / 14 days	21 сут / 21 days		14 сут / 14 days	21 сут / 21 days	
Былина Сибирь / 'Bylina Sibir'	100	5,00 [4,00 / 6,00]	50,00 [42,00 / 54,00]	46,15	48,72	0,014±0,005	0,03	0,13	79,49
	200	4,00 [4,00 / 5,00]*	37,00 [30,50 / 42,00]***	58,97*	58,97	0,007±0,002*	0,03	0,05	92,31
Иртыш / 'Irtysh'	100	11,00 [10,00 / 11,00]	125,00 [106,00 / 125,00]	37,50	82,50	0,003±0,001	0,55	0,98	55,00
	200	10,00 [7,50 / 11,00]*	110,00 [87,50 / 120,00]**	55,00*	85,00	0,004±0,001	0,40	0,40*	87,50*
Краса Мещеры / 'Krasa Meshchery'	100	4,00 [3,00 / 5,00]	110,00 [61,50 / 125,00]	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
	200	3,00 [1,00 / 4,00]***	36,00 [2,00 / 63,00]***	0,00	0,00	-	0,03	0,03	0,00
Садон / 'Sadon'	100	5,00 [5,00 / 6,00]	125,00 [120,00 / 125,00]	0,00	5,56	-	0,03	0,03	0,00
	200	5,00 [4,00 / 5,25]*	85,00 [58,75 / 120,00]***	0,00	0,00	-	0,03	0,03	0,00

Примечания: здесь и далее в табл. 2–4 и рис. 2–4 статистически значимые различия между уровнями ППФАФ: * – при p<0,05, ** – p<0,01, *** – p<0,001 /
Notes: here and further in tables 2–4 and fig. 2–4 statistically significant difference between PPFD levels at * – p<0,05, ** – p<0,01, *** – p<0,001

что при высадке в грунт такие структуры станут субстратом для сапрофитных микроорганизмов, что может снизить эффективность акклиматизации.

Боковые побеги не являются источником дополнительных черенков, поскольку имеют меньший диаметр, чем основной побег и мелкие листья. Высокую склонность к ветвлению продемонстрировал сорт Иртыш. Однако в отличие от данных, полученных в работе [10], увеличение освещенности приводило к уменьшению частоты ветвления, которая в условиях сниженной освещенности была близка к 100 %. Формирующиеся при этом растения образовывали более 2 боковых побегов. В связи с чем, несмотря на увеличение числа междоузлий, многие из них становились непригодными для черенкования. При тиражировании материала в нашей работе такие растения обычно отбраковываются. У сортов Краса Мещеры и Садон данное явление носило скорее случайный характер – достоверных различий с нулевой частотой не выявлено.

В отношении сортов селекции Омского АНЦ зафиксировано ещё одно нежелательное явление – формирование наростов (эдем), имевшее порой генерализованный характер, зачастую до 90 % площади стебля или листа (рис. 1). Увеличение освещенности сопровождалось ростом частоты этого явления у сорта Иртыш. Доля микрорастений сорта Былина Сибири с подобными структурами находилась в пределах 79–92 % и не зависела от освещенности (табл. 1).

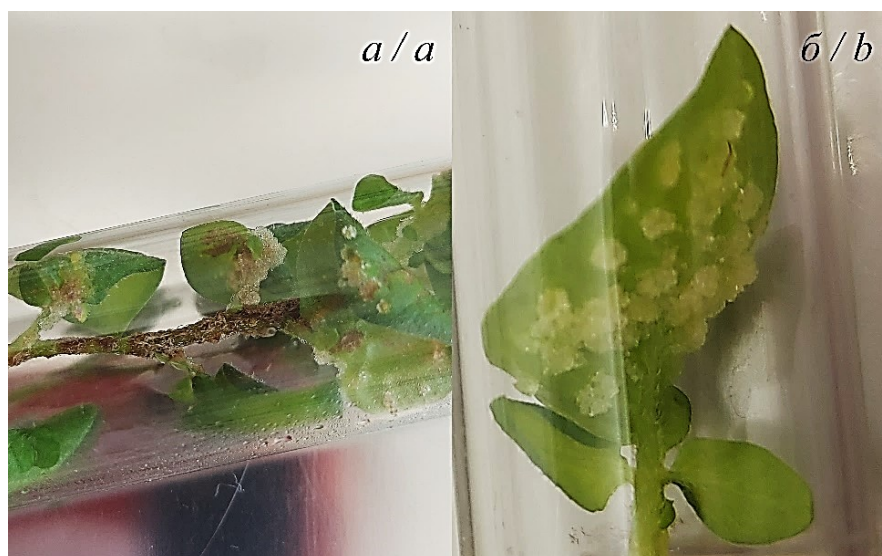


Рис. 1. Эдемы на стебле (а) и листе (б) микрорастения картофеля сорта Былина Сибири /
Fig. 1. Edems on the stem (a) and leaf (b) of potato microplant of 'Bylina Sibiri' cultivar

Сорта селекции ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха не имели новообразований на побегах и листьях. Следует отметить, что ранее таких структур не наблюдали ни у одного из сортов, входящих в коллекцию Красноярского НИИСХ. По всей видимости, здесь имеет место формирование эдем, упомянутое в работе [22]: эдемы образовывались при освещении микрорастений картофеля флуоресцентными лампами полного и синего спектров (ППФАФ 100 мкмоль/м²с). Авторы указывают на сорто-специфический характер – часть генотипов не имели таких наростов.

Образование эдем на листьях и черешках взрослых растений *ex vivo* чаще всего происходит, согласно данным исследований на различных сельскохозяйственных культурах [23], при низкой освещенности и высокой влажности, которые наблюдаются и в условиях пробирочной культуры. В текущем эксперименте, вероятно, сорта омской селекции были менее устойчивы к условиям высокой влажности.

В зависимости от условий освещенности изменялся и характер распределения процессов накопления биомассы. С увеличением ППФАФ наблюдали снижение доли сухого вещества, накапливаемого в стебле от общей массы растения (табл. 2). При этом увеличился сухой вес корней у всех сортов омской селекции и Краса Мещеры, сухой вес листьев у сортов селекции ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха на фоне сокращения их количества (количества междоузлий (табл. 1)).

Увеличилась доля листьев и корней в общем весе растения. В целом наблюдали перераспределение сухого веса в корневую зону, что видно из снижения отношения побегов к корням

(табл. 2). Полученные результаты согласуются с данными исследования на саженцах томата, где увеличение ППФАФ со 150 до 250 мкмоль/м²с приводило к уменьшению сухого веса побегов на фоне увеличения сухого веса корневой системы [24].

В работе на микрорастениях картофеля в автотрофной культуре [17] сухой вес растений увеличивался, а соотношение побегов к корням также снижалось при увеличении ППФАФ с 30 до 90 мкмоль/м²с. Дальнейшее увеличение освещенности вплоть до 120 мкмоль фотонов/м²с не приводило к изменению этих параметров. В противоположность, в работе [10] на сортах картофеля Рождественский и Снегирь показано снижение накопления биомассы при увеличении ППФАФ со 135 до 230 мкмоль/м²с и уменьшение веса корней.

Повышение уровня ППФАФ привело к статистически значимому увеличению площади четвертого снизу листа у большинства сортов (рис. 2, в). У сорта Иртыш площадь листьев отмечена больше уже у третьего по счёту листа (рис. 2, б). В свою очередь, статистически значимых различий по площади 2, 5-го листьев (рис. 2, а, г), а также листьев со всего растения между уровнями ППФАФ выявлено не было (данные не приводятся).

При этом увеличение сухого веса листьев у сортов селекции ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха (табл. 2) говорит о формировании более плотных листовых пластин. В работе [17] площадь листьев выходила на плато после 90 мкмоль/м²с. В исследованиях Е. П. Субботина с соавт. [10] наблюдали максимальную длину листьев при 135 мкмоль/м²с, снижавшуюся,

в противоположность полученным нами результатам, с увеличением ППФАФ при неизменной ширине листа.

Увеличение ППФАФ сопровождалось снижением содержания хлорофиллов на единицу сухого веса листа, а также каротиноидов у сорта Иртыш (табл. 3).

Аналогичные результаты получены в автотрофной культуре табака в работе [15] и в гетеротрофной культуре *Liquidambar styraciflua* L. [14]. В последнем случае снижение содержания хлорофиллов в микрорастениях, как и увеличение размеров светособирающих комплексов (ССК) (снижение соотношения $ХлА/ХлВ$), наблюдали с ростом ППФАФ со 155 до 315 мкмоль/м²с.

В то же время для гетеротрофной культуры табака [15] на среде с 3%-й сахарозой показано увеличение суммарного содержания хлорофиллов и каротиноидов с ростом ФАФ с 60 до 200 мкмоль/м²с, как и у сорта Краса Мещеры в текущем эксперименте (табл. 3), у которого повышалось содержание пигментов и отношение $Хл/Кар$, а также снижались размеры ССК. В среднем у всех сортов зафиксирована способность к поддержанию большей скорости транспорта электронов через ФС2 растениями, культивируемыми при 200 мкмоль/м²с, которая выразилась в большей $СТЭ_{макс}$ и высоких значениях E_k (табл. 4). Увеличение $СТЭ_{макс}$ на треть с ростом ППФАФ с 50 до 150 мкмоль/м²с показано также в работе [16] на микрорастениях *Castanea sativa* Mill. на средах с сахарозой.

Максимальный квантовый выход (F_v/F_m) у сортов селекции ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха в среднем был ниже при 200 мкмоль фотонов/м²с. Снижение F_v/F_m при увеличении ППФАФ со 150 до 250 мкмоль/м²с показано в работе [24] на саженцах томата. В то же время дальнейшее увеличение освещенности в упомянутой работе приводило к увеличению этого параметра. В работе [4] на микрорастениях клубники увеличение ППФАФ с 50 до 100 мкмоль/м²с приводило также к снижению F_v/F_m .

Таблица 2 – Характеристика накопления сухого вещества микрорастениями картофеля в различных условиях освещенности *in vitro* (среднее±ст.ош.) /
Table 2 – Ways of dry matter accumulation of potato microplants under different conditions of illumination *in vitro* (mean±SE)

Параметр / Parameter	Орган / Organ	Былина Сибирь / 'Bylina Sibiri'		Иртыш / 'Irtysh'		Краса Мещеры / 'Krasa Meshchery'		Садон / 'Sadon'	
		ППФАФ, мкмоль/м ² с / PPFD, μmol/m ² s							
		100	200	100	200	100	200	100	200
Сухой вес, г/растение / Dry weight, g/plant	Стебель / Stem	0,012±0,001	0,009±0,001	0,02±0,001	0,023±0,001	0,075±0,004	0,041±0,001**	0,117±0,003	0,103±0,007**
	Корни / Roots	0,015±0,001	0,016±0,001	0,013±0,001	0,017±0,001*	0,026±0,002	0,037±0,002*	0,069±0,007	0,109±0,021
	Листья / Leaves	0,010±0,001	0,009±0,001	0,006±0	0,007±0,001	0,023±0,002	0,032±0,001**	0,038±0,003	0,070±0,005**
	Растение / Plant	0,037±0,001	0,034±0,001	0,039±0,002	0,047±0,001**	0,018±0,001	0,027±0,001**	0,032±0,002	0,040±0,004**
Отношение веса побега к весу корневой системы / Shoot weight to roots weight ratio		1,43±0,02	1,09±0,06*	1,96±0,04	1,81±0,08	3,81±0,12	1,99±0,09**	2,27±0,17	1,69±0,27**
	Вес органа к весу растения / Organ weight to plant weight ratio	0,33±0,01	0,27±0,01**	0,52±0,01	0,49±0,01*	0,61±0,01	0,37±0,01**	0,52±0,02	0,37±0,02**
	Корни / Roots	0,41±0	0,48±0,01*	0,34±0	0,36±0,01	0,21±0	0,34±0,01**	0,31±0,02	0,38±0,04**
	Листья / Leaves	0,26±0	0,25±0,01	0,14±0,01	0,15±0	0,18±0,01	0,29±0,01**	0,17±0	0,25±0,03**

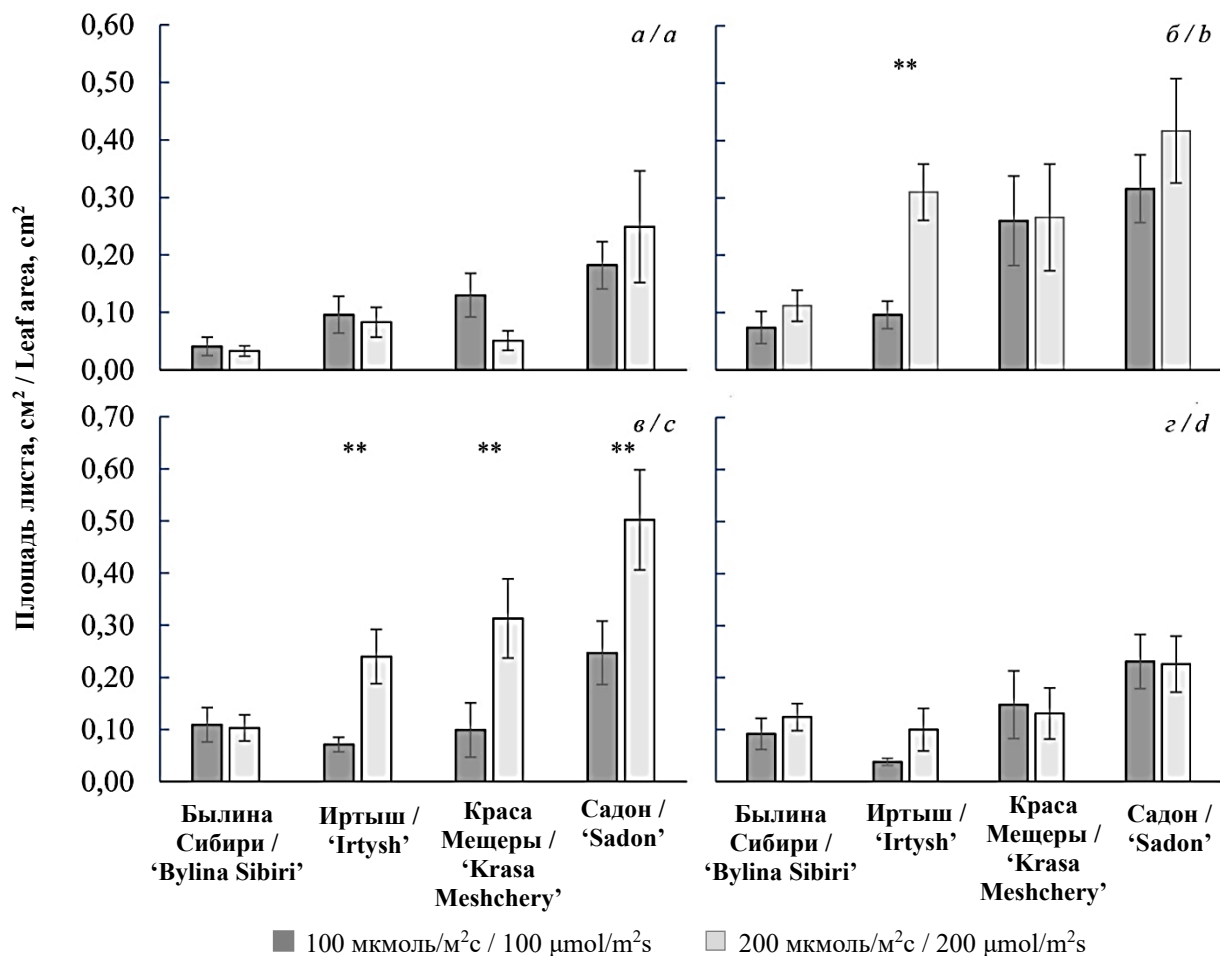


Рис. 2. Влияние ППФАФ на площадь 2-го (а), 3-го (б), 4-го (в) и 5-го (г) по счёту листьев микро-растений картофеля у различных сортов (среднее±ст.ош.) /

Fig. 2. Influence of PPFD on area of the 2nd (a), 3rd (b), 4th (c) and 5th (d) leaf of potato microplants of different cultivars (mean±SE)

Таблица 3 – Концентрация фотосинтетических пигментов в листьях микрорастений картофеля при разном уровне ППФАФ (среднее±ст.ош.) /

Table 3 – Photosynthetic pigments concentration in leaves of potato microplants under different PPFD (mean±SE)

Сорт / Cultivar	ППФАФ, мкмоль/м²с / PPFD, μmol/m²s	Концентрация пигментов, мг/г сухого веса / Pigment concentration, mg/g of dry weight				Хл/Кар / Chlorophylls / Carotenoids	Доля ХлВ в ССК / Part of Chl b in LHC
		Кар / Carotenoids	ХлА / Chl a	ХлВ / Chl b	ХлА+ХлВ / Chl a+Chl b		
Былина Сибири / 'Bylina Sibiri'	100	0,84±0,2	3,01±0,82	1,17±0,33	4,19±1,14	4,81±0,26	0,61±0,02
	200	1,05±0,17	3,4±0,8	1,31±0,27	4,71±1,07	4,39±0,48	0,63±0,04
Иртыш / 'Irtiysh'	100	0,49±0,04	1,87±0,18	0,67±0,07	2,54±0,25	5,12±0,07	0,58±0,01
	200	0,18±0,02**	0,41±0,09**	0,16±0,03**	0,57±0,12**	3,09±0,47**	0,66±0,08
Краса Мещеры / 'Krasa Meshchery'	100	0,79±0,03	3,26±0,13	1,21±0,03	4,46±0,16	5,67±0,11	0,59±0,01
	200	1,02±0,26	4,76±1,28	1,64±0,44	6,41±1,73*	6,20±0,05**	0,56±0,01*
Садон / 'Sadon'	100	0,41±0,05	1,72±0,23	0,67±0,09	2,40±0,32	5,73±0,15	0,61±0,01
	200	0,69±0,15	3,00±0,66	1,08±0,23	4,09±0,89	5,92±0,12	0,59±0,02

Таблица 4 – Основные характеристики нециклического транспорта электронов в листьях микрорастений картофеля при разной ППФАФ /
Table 4 – The main characteristics of noncyclic electron transport in the leaves of the microplants under different level of PPFD

<i>Copm / Cultivar</i>	ППФАФ, мкмоль/м ² с / PPFD, $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	$CT\mathcal{E}_{\text{макс}} /$ ETR_{max}	E_k	F_v/F_m
Былина Сибири / 'Bylina Sibiri'	100	52,92±1,94	264,35±15,98	0,830±0,002
	200	65,75±2,79*	266,55±16,02	0,821±0,004
Иртыш / 'Irtys'	100	36,67±4,28	253,65±20,85	0,799±0,013
	200	54,24±4,08**	343,24±27,66*	0,822±0,003
Среднее* / Avarage*	100	44,70±2,79	315,22±24,59	0,816±0,007
	200	56,89±2,77**	362,78±21,77	0,822±0,002
Краса Мещеры / 'Krasa Meshchery'	100	50,84±4,37	211,31±22,21	0,828±0,004
	200	59,08±4,97	271,89±18,19	0,820±0,005
Садон / 'Sadon'	200	53,07±5,32	221,34±30,67	0,829±0,003
	200	76,74±5,31*	295,93±29,78	0,815±0,007
Среднее** / Avarage**	100	51,85±2,72	267,34±18,30	0,828±0,003
	200	67,02±3,95**	340,32±17,05**	0,817±0,005*
Среднее / Avarage	100	47,20±2,10	298,52±17,45	0,820±0,004
	200	61,26±2,42**	353,08±14,34*	0,820±0,002

* По сортам селекции Омского АНЦ; ** по сортам селекции ФИЦ картофеля им. А. Г. Лорха /
* Among the cultivars bred by Omsk Agricultural Scientific Center; ** among the cultivars bred by Lorkh Federal Research Center of Potato

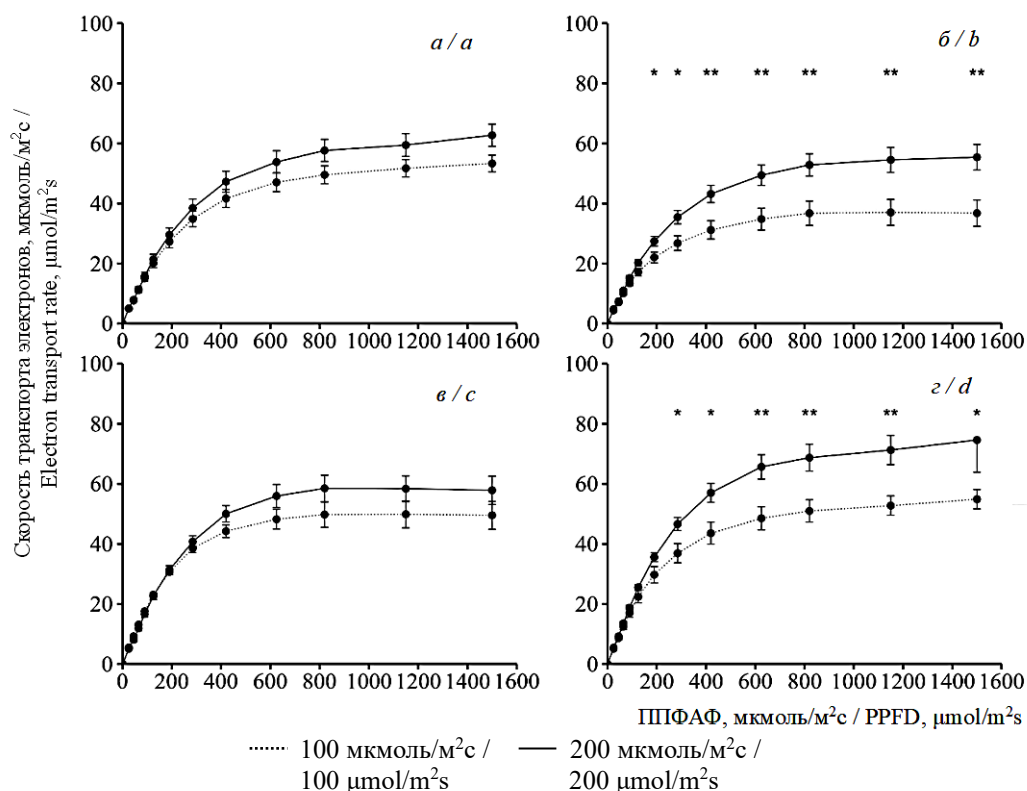


Рис. 3. Скорость транспорта электронов через ФС2 листьев микрорастений картофеля при разной интенсивности освещения у сортов картофеля: Былина Сибири (а); Иртыш (б); Краса Мещеры (в); Садон (г) /
Fig. 3. Electron transport rate through PS2 of leaves of potato microplants of different cultivars: 'Bylina Sibiri' (a); 'Irtys' (б); 'Krasa Meshchery' (в); 'Sadon' (г) under different illumination intensity

Снижение F_v/F_m в автотрофной культуре при ППФАФ 200 мкмоль/м²с отмечено и в работе [15] на микрорастениях табака. В то время как при гетеротрофном типе культуры увеличение ППФАФ с 60 до 200 мкмоль/м²с не приводило к снижению F_v/F_m . В работе [9] с микрорастениями картофеля, культивируемыми при 300 и 600 мкмоль/м²с, не выявлено различий в скорости ассимиляции CO₂ при записи световой кривой вплоть до 1100 мкмоль/моль CO₂.

У растений сорта Иртыш, выращенных при 200 мкмоль фотонов/м²с, на фоне снижения содержания пигментов фотосинтеза зафиксиро-

вано статистически значимо большая СТЭ на протяжении всей БСК, чем у сформировавшихся при ППФАФ 100 мкмоль/м²с (рис. 3). Аналогичная форма БСК отмечена у микрорастений сорта Садон.

Активная работа цепи передачи электронов у растений, культивируемых при высоком уровне ППФАФ, видна и по числу открытых реакционных центров (РЦ), что отражает коэффициент фотохимического тушения флуоресценции q_P у всех генотипов (рис. 4, а, б, г), кроме сорта Краса Мещеры (рис. 4, в).

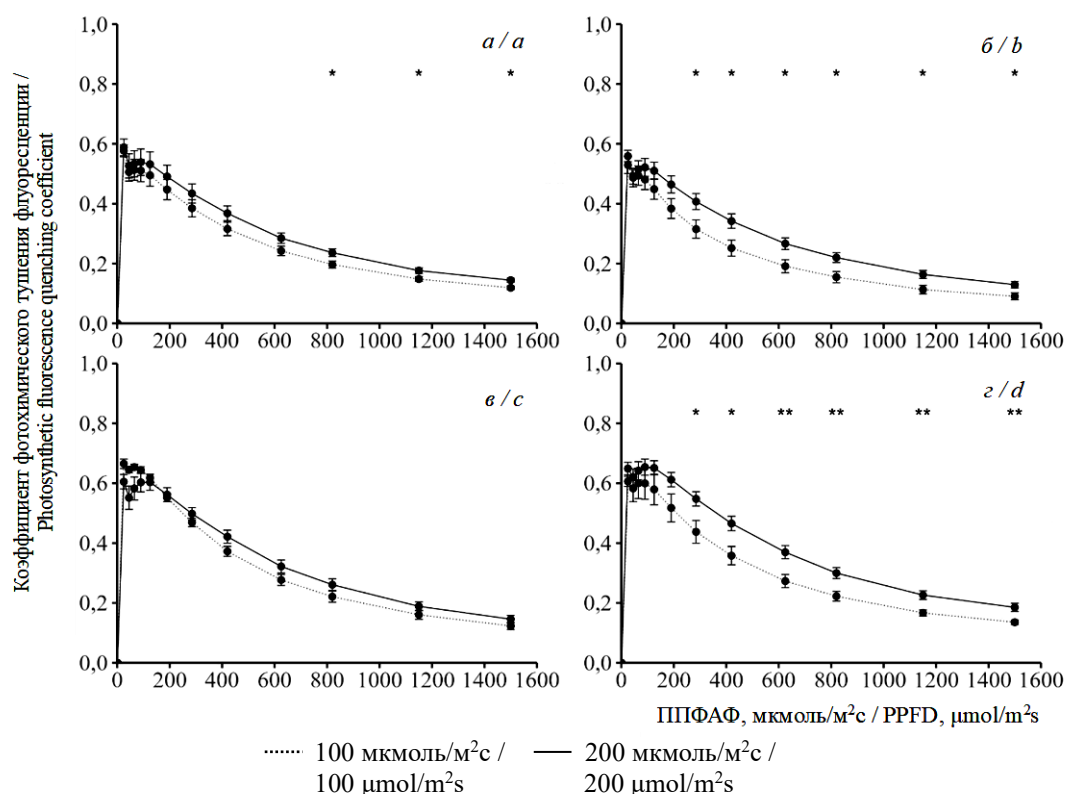


Рис. 4. Коэффициент фотохимического тушения флуоресценции листьев микрорастений картофеля при разной интенсивности освещения у различных сортов картофеля: Былина Сибири (а); Иртыш (б); Краса Мещеры (в); Садон (г) /

Fig. 4. Photosynthetic fluorescence quenching coefficient of leaves of potato microplants of different cultivars: 'Bylina Sibiri' (a), 'Irtysh' (b), 'Krasa Meshchery' (c), 'Sadon' (d) under different illumination intensity

При первых вспышках насыщающего света закрытие РЦ происходило схожим образом у микрорастений в обоих вариантах опыта. В дальнейшем работоспособность цепи передачи электронов у растений с низким уровнем ППФАФ восстанавливалась медленнее. В работе [16] получены аналогичные результаты относительно пропорции открытых реакционных центров при 50 и 150 мкмоль/м²с, говорящие о повышенной эффективности конверсии световой энергии растений, сформировавшихся при большей освещенности.

Заключение. Результаты комплексной оценки реакций микрорастений сортов картофеля на изменение уровня освещенности показали, что наилучшим вариантом по эффективности микрклонального размножения является ППФАФ 100 мкмоль/м²с, обеспечивающий большее число и длину междоузлий. Высокая освещенность, 200 мкмоль фотонов/м²с, лучше подходит для выращивания микрорастений, предназначенных для высадки в грунт или условия аэропонных установок, как способствующая формированию более низкорослых

растений с хорошо развитой корневой системой и большей эффективностью работы фотосинтетического аппарата, что будет способствовать их скорейшей акклиматизации после пересадки. При этом необходимо учитывать особенности отдельных сортов. Так, сорт Иртыш даже при 200 мкмоль/м²с формирует очень длинные побеги, не снижая соотношения побеги/корни. Для данного сорта необходимо подобрать условия для формирования более компактных растений в разрезе посадочного материала. Сорт Краса Мещеры в этих условиях формирует очень мелкие растения с видоизмененными побегами, которые, возможно, будут иметь низкую приживаемость *in vivo*. При низкой освещенности сорт Иртыш начинает активнее ветвиться, что делает такие условия менее предпочтительными для тиражирования растений, чем при повышенной – 200 мкмоль/м²с.

На основании полученных в эксперименте данных и анализа исследований других авторов можно сделать заключение о том, что использование ППФАФ в пределах 100 мкмоль/м²с способствует увеличению

размеров микрорастений, биомассы побегов, содержания пигментов в листьях и максимального эффективного квантового выхода ФС2. В то время как дальнейшее увеличение ППФАФ, наоборот, стимулирует набор корневой массы, снижает содержание фотосинтетических пигментов на фоне увеличения площади листьев отдельных ярусов, повышая устойчивость цепи передачи электронов к высокой ППФАФ, что видно из увеличения $СТЭ_{\max}$. Сортоспецифичность реакции, описанная другими авторами, показана и в нашей работе. Например, сорт Краса Мещеры по содержанию пигментов имеет динамику, отличную от указанной выше, и формирует микроклубни уже в первую неделю культивирования при высокой ППФАФ. Сорт Былина Сибири не увеличивает площадь листьев с ростом интенсивности ППФАФ. Сорта омской селекции образуют как скопления дедифференцированных клеток в области корневой зоны, так и эдемы на «надземной» части растения, а частота этих явлений зависит от уровня ППФАФ.

References

1. Wolf S., Kalman-Rotem N., Yakir D., Ziv M. Autotrophic and heterotrophic carbon assimilation of *in vitro* grown potato (*Solanum tuberosum* L.) plants. Journal of Plant Physiology. 1998;153(5-6):574–580. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(98\)80206-X](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(98)80206-X)
2. Seabrook J. Light effects on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum*) in vitro: A review. American Journal of Potato Research. 2005;82:353–367. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02871966>
3. Головацкая И. Ф., Дорофеев В. Ю., Медведева И. Е., Никифоров П. Е., Карначук Р. А. Оптимизация условий освещения при культивировании микроклонов *Solanum tuberosum* L. сорта Луговской *in vitro*. Вестник Томского государственного университета. Биология. 2013;(4):133–144. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21134451> EDN: RUMPUZ
4. Golovatskaya I. F., Dorofeev V. Yu., Medvedeva I. E., Nikiforov P. E., Karnachuk R. A. Optimization of illumination conditions in cultivation process of *Solanum tuberosum* L. cv. Lugovskoy microcuttings *in vitro*. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology. 2013;(4):133–144. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21134451>
5. Kepenek K. Photosynthetic Effects of Light-emitting Diode (LED) on in Vitro-derived Strawberry (*Fragaria x Ananassa* cv. Festival) Plants Under in Vitro Conditions. Erwerbs-Obstbau. 2019;61:179–187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10341-018-00414-0>
6. Khalil M., Samy M., Aal A., Hamed A. The effect of light quality and intensity on in vitro potato cultures. Journal of Agricultural Sciences – Sri Lanka. 2023;18(3):364–374. DOI: <https://doi.org/10.4038/jas.v18i3.9930>
7. Мартиросян Ю. Ц., Диловарова Т. А., Мартиросян В. В., Креславский В. Д., Кособрюхов А. А. Действие светодиодного облучения различного спектрального состава на фотосинтетический аппарат растений картофеля в культуре *in vitro*. Сельскохозяйственная биология. 2016;51(5):680–687. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.1.130rus> EDN: WZJQJN
8. Martirosyan Yu. Ts., Dilovarova T. A., Martirosyan V. V., Kreslavskiy V. D., Kosobryukhov A. A. Photosynthetic apparatus of potato plants (*Solanum tuberosum* L.) grown *in vitro* as influenced by different spectral composition of led radiation. Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology. 2016;51(5):680–687. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.1.130rus>
9. Nakonechnaya O. V., Subbotin E. P., Grishchenko O. V., Gafitskaya I. V., Orlovskaya I. Yu., Kholin A. S. et al. In vitro potato plantlet development under different polychromatic LED spectra and dynamic illumination. Botanica Pacifica: a Journal of Plant Science and Conservation. 2021;10(1):69–74. DOI: <https://doi.org/10.17581/bp.2021.10102>

8. Grishchenko O., Subbotin E., Gafitskaya I., Vereshchagina Y., Burkovskaya E., Khrolenko Y. et al. 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.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2021.04.007>

9. Stutte G. W., Yorio N. C., Wheeler R. M. Interacting effects of photoperiod and photosynthetic photon flux on net carbon assimilation and starch accumulation in potato leaves. *Journal of the American Society for HortScience*. 1996;121(2):264–268. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS.121.2.264>

10. 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;21(2):32–39. DOI: <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.21.2.4> EDN: XVLNAT

Subbotin E. P., Gafitskaya I. V., Nakonechnaya O. V., Zhuravlev Yu. N., Kul'chin Yu. N. The influence of artificial sunlight and its intensity on the growth and development of *Solanum tuberosum* regenerants. *Turczaninowia*. 2018;21(2):32–39. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14258/turczaninowia.21.2.4>

11. Kulchin Y. N., Nakonechnaya O. V., Gafitskaya I. V., Grishchenko O. V., Epifanova T. Y., Orlovskaya I. Y. et al. Plant Morphogenesis under Different Light Intensity. *Defect and Diffusion Forum*. 2018;386:201–206. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.386.201>

12. Лисина Т. Н., Бурдышева О. В., Шолгин Е. С. Влияние светодиодного освещения различного спектра на растения картофеля (*Solanum tuberosum* L.) при выращивании *in vitro* (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(6):913–923. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.913-92> EDN: XSVSWJ

Lisina T. N., Burdysheva O. V., Sholgin E. S. Effect of different LEDs light spectrum on potato (*Solanum tuberosum* L.) *in vitro* (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023;24(6):913–923. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.913-92>

13. Варушкина А. М., Луговская Н. П., Максимов А. Ю. Рост и продуктивность картофеля (*Solanum tuberosum* L.) в условиях светокультуры. *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. 2019;(2):37–46. DOI: <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.4> EDN: LBXBRF

Varushkina A. M., Lugovskaya N. P., Maksimov A. Yu. The growth and productivity of potato (*Solanum tuberosum* L.) in photoculture. *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo tsentra* = *Perm Federal Research Centre Journal*. 2019;(2):37–46. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2019.2.4>

14. Lee Ni, Wetzstein H. Y., Sommer H. E. Effects of Quantum Flux Density on Photosynthesis and Chloroplast Ultrastructure in Tissue-Cultured Plantlets and Seedlings of *Liquidambar styraciflua* L. towards Improved Acclimatization and Field Survival. *Plant Physiology*. 1985;78(3):637–641. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.78.3.637>

15. Kadlecěk P., Tichá I., Haisel D., Čapková V., Schäfer C. Importance of *in vitro* pretreatment for *ex vitro* acclimatization and growth. *Plant Science*. 2001;161(4):695–701. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00456-3](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00456-3)

16. Sáez P. L., Bravo L. A., Latsague M. I., Sánchez M. E., Ríos D. G. Increased light intensity during *in vitro* culture improves water loss control and photosynthetic performance of *Castanea sativa* grown in ventilated vessels. *Scientia Horticulturae*. 2012;138:7–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.005>

17. Kitaya Y., Fukuda O., Kozai T., Kirdmanee C. Effects of light intensity and lighting direction on the photoautotrophic growth and morphology of potato plantlets *in vitro*. *Scientia Horticulturae*. 1995;62(1–2):15–24. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)00760-D](https://doi.org/10.1016/0304-4238(94)00760-D)

18. Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987;148:350–382. DOI: [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

19. Platt T., Gallegos C. L., Harrison W. G. Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton. *Journal of Marine Research*. 1980;38:687–701.

20. Kacheyo O. C., Schneider H. M., de Vries M. E., Struik P. C. Shoot growth parameters of potato seedlings are determined by light and temperature conditions. *Potato Research*. 2024;67:1159–1186. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11540-023-09681-1>

21. Naqvi B., Abbas H., Ali H. Evaluation of *in vitro* tuber induction ability of two potato genotypes. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 2019;56:77–81.

22. Wilson D. A., Weigel R. C., Wheeler R. M., Sager J. C. Light spectral quality effects on the growth of potato (*Solanum tuberosum* L.) nodal cuttings *in vitro*. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 1993;29:5–8. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02632231>

23. Sita N. C., Iriawati, Kiriwa Y., Suzuki K. Intumescence: A Serious Physiological Disorder in Plants. *Reviews in Agricultural Science*. 2024;12:182–212. DOI: https://doi.org/10.7831/ras.12.0_182

24. Zheng Y., Zou J., Lin S., Jin C., Shi M., Yang B. et al. Effects of different light intensity on the growth of tomato seedlings in a plant factory. *PLoS ONE*. 2023;18(11):e0294876. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294876>

Сведения об авторах

✉ **Ступко Валентина Юрьевна**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», пр-кт Свободный, д. 66, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4430-2719>, e-mail: stupko@list.ru

Луговцова Светлана Юрьевна, старший научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», пр-кт Свободный, д. 66, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-9455>

Помыткин Николай Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», пр-кт Свободный, д. 66, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8977-6523>

Кукушкина Кристина Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», пр-кт Свободный, д. 66, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8915-912X>

Черемисин Александр Иванович, кандидат с.-х. наук, заведующий отделом картофеля, заведующий лабораторией семеноводства картофеля, ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», пр-кт Королёва, д. 28, г. Омск, Российская Федерация, 644012, e-mail: biocentr@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8070-0661>

Information about the authors

✉ **Valentina Yu. Stupko**, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Laboratory of Physiology and Biotechnology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Svobodny prospect, 66, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4430-2719>, e-mail: stupko@list.ru

Svetlana Yu. Lugovtsova, senior researcher, the Laboratory of Physiology and Biotechnology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Svobodny prospect, 66, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-9455>

Nikolay S. Pomytkin, junior researcher, the Laboratory of Physiology and Biotechnology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Svobodny prospect, 66, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8977-6523>

Kristina V. Kukushkina, junior researcher, the Laboratory of Physiology and Biotechnology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Svobodny prospect, 66, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8915-912X>

Alexander I. Cheremisin, PhD in Agricultural Science, Head of the Potato Department, Head of the Laboratory of Potato Seed Production, Federal State Budgetary Scientific Institution “Omsk Agricultural Scientific Center”, Korolev prospect, 26, Omsk, Russian Federation, 644012, e-mail: biocentr@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8070-0661>

✉ – Для контактов / Corresponding author