

ВЛИЯНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ В КУЛЬТУРЕ *IN VITRO*

Будаговская О. Н.¹, Будаговский А. В.², Соловых Н. В.³, Янковская М. Б.⁴

¹ доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина», г. Мичуринск, Россия
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ, г. Мичуринск, Россия

² доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина», г. Мичуринск, Россия
ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ», г. Мичуринск, Россия

³ кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник
ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина», г. Мичуринск, Россия

⁴ научный сотрудник
ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина», г. Мичуринск, Россия

e-mail: budagovsky@mail.ru

THE EFFECT OF THE MULTIPLICITY OF LASER IRRADIATION ON *IN VITRO* IN CULTURE DEVELOPMENT OF PLANTS

Budagovskaya O. N.¹, Budagovsky A. V.², Solovykh N. V.³, Yankovskaya M. B.⁴

¹ DrSc in Engineering, leading researcher
FSBSI "FSC named after I. V. Michurin", Michurinsk, Russia
Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia

² DrSc in Engineering, leading researcher
FSBSI "FSC named after I. V. Michurin", Michurinsk, Russia
Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia

³ PhD in Biology, leading researcher
FSBSI "FSC named after I. V. Michurin", Michurinsk, Russia

⁴ Researcher
FSBSI "FSC named after I. V. Michurin", Michurinsk, Russia

e-mail: budagovsky@mail.ru

Аннотация. На основе анализа изменения числа и длины микропобегов микрорастений малины Оранжевое чудо и ежевики Black Satin была проведена оценка эффективности различных приемов лазерного воздействия на растения в культуре *in vitro*. Цель исследований заключалась в оптимизации параметров лазерного воздействия, обеспечившего минимальное энергопотребление и максимальный стимуляционный эффект. Для проведения экспериментов была разработана компьютеризированная лазерная установка, позволяющая создавать режим непрерывной, импульсной и сканирующей засветки любой длительности и периодичности. Показано, что наибольшее (двукратное) увеличение ростовых показателей может быть получено при использовании серии коротких (1; 7,5 с) импульсов когерентного света.

Ключевые слова: микрочеренки, культивирование *in vitro*, стимуляционный эффект, периодическое лазерное облучение, компьютеризированная установка.

Abstract. Based on an analysis of changes in the number and length of shoots of microplants of the Orangevoo Chudo raspberry and Black Satin blackberry, the effectiveness of various methods of laser irradiation on plants *in vitro* culture was assessed. The goal of the research was to optimize the parameters of laser exposure to ensure maximum energy efficiency and sufficient stimulation effect. To carry out the experiments, a computerized laser device was developed that allows creating continuous, pulsed and scanning illumination modes of any duration and frequency. It is shown that the greatest (twofold) increase in growth rates can be obtained using a series of short (1; 7.5 s) pulses of coherent light.

Key words: microcuttings, *in vitro* cultivation, stimulation effect, periodic laser irradiation, computerized device.

ВВЕДЕНИЕ

В растениеводстве лазерное облучение используется для увеличения всхожести семян и урожайности сельскохозяйственных растений [1, 11, 16], усиления устойчивости к засухе [14, 17] и болезням [20, 21], при вегетативном размножении [1, 9, 19], стимуляции растений *in vitro* [12, 18, 26], а также для повышения накопления биоактивных компонентов в плодах [24] и сохранности фруктов и овощей в послеуборочный период [1, 10].

С практической точки зрения важно определить режимы облучения, обеспечивающие устойчивый фотоиндуцированный эффект, высокую производительность

и минимальное энергопотребление. Как правило, рассматривают различные комбинации длины волны, интенсивности лазерного пучка, длительности и кратности обработок [7, 8, 15]. Несмотря на значительное количество исследований, вопрос об оптимальных режимах обработки остаётся дискуссионным и однозначного ответа на него не получено. Один из наиболее проблемных и трудоемких объектов для массового облучения являются растения культуры *in vitro*, находящиеся в хрупких стеклянных колбах или пробирках. Для увеличения производительности лазерной обработки используют оптические сканирующие системы [2, 4, 6], но эффективность их применения для биотехнологических объектов

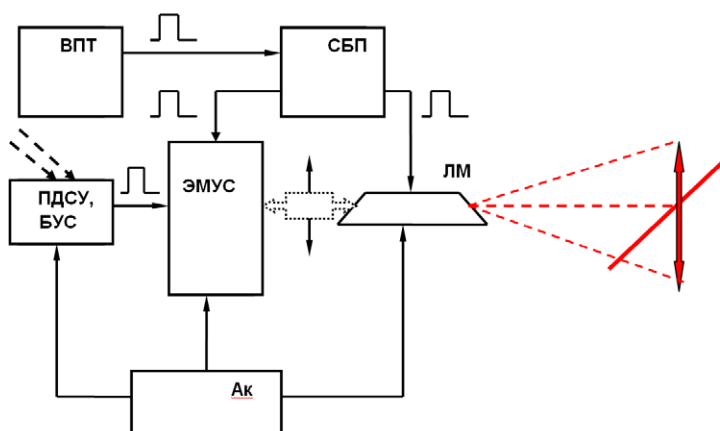


Рисунок 1. Структурно-функциональная схема установки для лазерного облучения культуры *in vitro*



Рисунок 2. Процесс лазерного облучения культуральных растений в режиме сканирования полосой

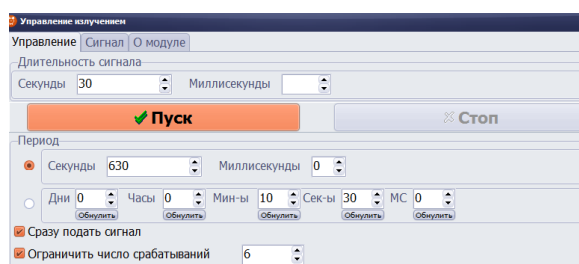


Рисунок 3. Интерфейс компьютерной программы управления циклическим режимом облучения

не доказана. В связи с этим целью настоящей работы являлась оптимизация параметров лазерного воздействия, обеспечившего минимальное энергопотребление и максимальный стимуляционный эффект культивируемых *in vitro* растений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперименты проводили на растениях ежевики (род *Rubus*) сорта Black Satin и малины красной (*Rubus idaeus* L.) сорта Оранжевое чудо. Для размножения ежевики *in vitro* микрочеренки высаживали на среду с минеральным составом по прописи Мурасиге и Скуга (MS) с уменьшенным вдвое содержанием макросолей, содержащую 20 г/л сахарозы, 0,5 мг/л гибберелловой кислоты (ГК), 0,1 мг/л β-индолил-3-масляной кислоты (ИМК) и 0,5–1,0 мг/л 6-бензиламинопурина (6-БАП). Для укоренения малины красной и ежевики *in vitro* микрочеренки высаживали на среду с минеральным составом по прописи Мурасиге и Скуга (MS), содержащую половинное количество макросолей, 15 г/л сахарозы, 0,5 мг/л ГК и 0,5 мг/л ИМК.

Лазерное облучение микрочеренков проводили через стенки колб после предварительной 60–90 минутной адаптации к темноте. В качестве излучателя использовали полупроводниковый лазер с длиной волны 650 ± 2 нм, выходной пучок которого в зависимости от задач эксперимента был сформирован в линию или круглое пятно с плотностью мощности 2 Вт/м². Растения культивировали в течение 2 месяцев при 16-часовом фотопериоде, при этом общая полихроматическая освещённость составляла 2000 Лк, температура 22–24°C. Каждые 10 дней определяли число и длину побегов и корней на эксплант. Повторность опытов — пятикратная.

Энергетические параметры излучения контролировали с помощью высокоточного измерителя лазерного излучения VEGA Ophir (Израиль) и calorиметрического измерителя ИМО-2Н («Эталон», Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения экспериментов создано оптико-электронное оборудование с компьютерным управлением, способное формировать потоки когерентного света определённой длительности, периодичности, скважности и плотности мощности (рис. 1–3). Оно включает в себя внешний программируемый таймер (ВПТ), приемник дистанционного сигнала управления (ПДСУ), блок управления сканером (БУС), лазерный модуль (ЛМ) со встроенной оптической системой развертки пучка по горизонтали, электромеханический узел сканирования (ЭМУС) лазерного пучка по вертикали, сетевой блок питания (СБП) и зарядки аккумулятора, аккумулятор автономного питания (АК). Установка может работать в трех режимах управления — от встроенного программируемого таймера, от дистанционного устройства, управляемого компьютером и непосредственно от компьютера. С помощью двух оптико-механических узлов предусмотрена возможность формирования или круглого неколлимированного пучка, или полосы.

Установка осуществляет сканирование лазерным пучком по вертикали «Y» (вертикаль) и развертку пучка в линию «X» (горизонталь). Угол развертки по координате «X» обеспечивается цилиндрической линзой и составляет 110°; а по координате «Y» производится с помощью электромеханического сканера и составляет 25°. Скорость сканирования пучка плавно меняется в диапазоне от 3 до 50 циклов в минуту.

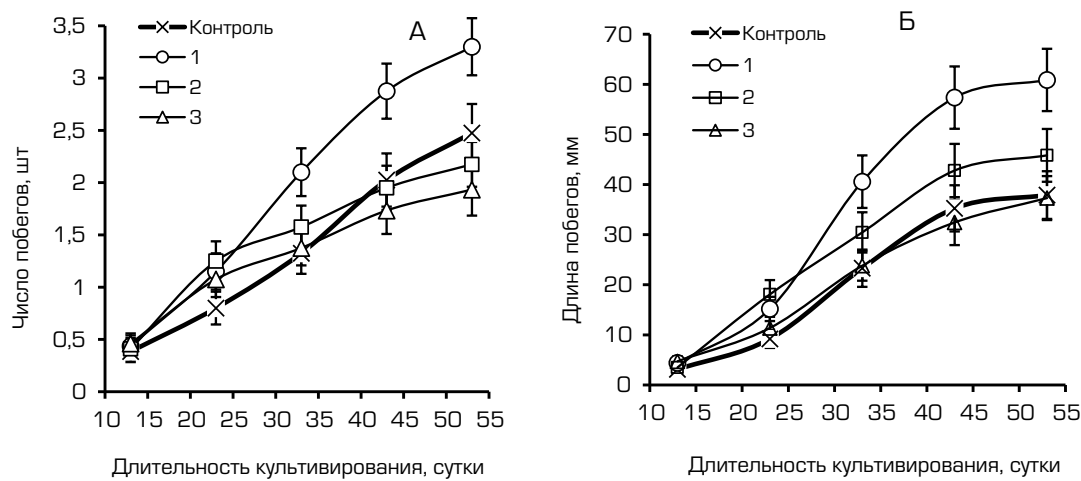


Рисунок 4. Число побегов (А) и длина (Б) ежевики Блэксэтин *in vitro* в зависимости от длительности культивирования и числа лазерных облучений. 1 — однократное, 2 — 1 раз в 7 дней, 3 — ежедневное

Таблица 1 — Режимы лазерной обработки микрочеренков

№ экперим. серии		Длительность одного цикла, с	Форма зондирующего потока	Периодичность облучения	Число циклов	Суммарная длительность обработки
1 серия «Пятно»	1.1	480 с	Пятно	однократно	1	8 мин
	1.2	480 с	Пятно	1 раз в неделю	1	48 мин
	1.3	480 с	Пятно	Ежедневно, 40 дней	1	360 мин
2 серия «Полоса»	2.1	240 с	Неподвижная Полоса, ширина 4 мм	однократно	1	4 мин
	2.2	12 с	Сканирующая Полоса, 5 ц/мин	однократно	20	4 мин
	2.3	3 с	Сканирующая Полоса, 21 ц/мин	однократно	84	4 мин
	2.4	1,5 с	Сканирующая Полоса, 42 ц/мин	однократно	168	4 мин
3 серия «Импульс»	3.1	1 с	Пятно	однократно	8	8 с
	3.2	7,5 с	Пятно	однократно	8	60 с
	3.3	15 с	Пятно	однократно	8	120 с

Компьютеризированный таймер обеспечивает широкий диапазон длительностей включения-отключения [от 400 миллисекунд до нескольких часов], в различное время суток и по дням недели [рис. 4]. С помощью данной установки было проведено три серии экспериментов с различными режимами облучения [табл. 1]. В первой серии лазерная обработка проходила неподвижным пятном, охватывающим всю колбу, в течение 480 с по следующим вариантам опыта: 1.1 — однократно; 1.2 — один раз каждые 7 дней; 1.3 — ежедневно в течение всего времени культивирования. Во второй серии лазерное облучение проходило узкой (4 мм) неподвижной полосой в течение 240 с [серия 2.1], а также в режиме сканирования полосой с частотами 5; 21; и 42 цикла в минуту [серии 2.2–2.4 соответственно]. В третьей серии воздействовали на микрочеренки световыми [лазерными] импульсами длительностью 1; 7,5 и 15 секунд с темновыми интервалами между ними 30 с [серии 3.1–3.3]. В каждом варианте опыта по 8 циклов. В каждой серии экспериментов в качестве

контроля использовали колбы с микрочеренками, проходившие все манипуляции, что и опытные, только при выключенной лазерной установке. В первой серии опытов лазерному облучению подвергали микрочеренки на среде размножения. Обе культуры показали стимуляционный эффект, выраженный в увеличении как длины, так и количества образовавшихся побегов, только у ежевики это проявляется раньше, существенно сильнее и стабильнее [рис. 4]. Коэффициент стимуляции зависел не только от видовых особенностей, но и от длительности культивирования [табл. 2]. Наиболее выражено влияние лазерной досветки через месяц, затем различия с контролем нивелируются. Наиболее важный результат первой серии экспериментов заключался в том, что многократная засветка не дает существенных преимуществ по сравнению с однократным облучением. А в случае с ежевикой, ежедневная лазерная обработка после кратковременной активизации [на 10–20 день] приводит даже к некоторому ослаблению жизнедеятельности по сравнению

Таблица 2 — Коэффициент стимуляции развития побегов микрочеренков малины и ежевики (в скобках — достоверность различия с контролем) по первой серии опытов

Дни культивирования		Серия 1.1 «Однократное»		Серия 1.2 «1 раз в 7 дней»		Серия 1.3 «Ежедневно»	
		К _{ст.длина} (P)	К _{ст.число} (P)	К _{ст.длина} (P)	К _{ст.число} (P)	К _{ст.длина} (P)	К _{ст.число} (P)
Ежевика «Black Satin»	13	1,41 (0,8248)	1,13 (0,7019)	1,12 (0,6402)	1,07 (0,5848)	1,51 (0,9153)	1,2 (0,7802)
	23	1,65 (0,9632)	1,44 (0,9115)	1,96 (0,9957)	1,56 (0,9644)	1,24 (0,7860)	1,34 (0,8841)
	33	1,74 (0,9919)	1,58 (0,9893)	1,31 (0,9064)	1,2 (0,8064)	1,02 (0,5438)	1,04 (0,5763)
	43	1,63 (0,9943)	1,42 (0,9872)	1,21 (0,8631)	0,96 (0,5959)	0,92 (0,5331)	0,86 (0,7444)
	53	1,60 (0,9960)	1,33 (0,9823)	1,20 (0,8737)	0,88 (0,8152)	0,98 (0,5709)	0,78 (0,9310)
Малина «Оранжевое чудо»	16	0,72 (0,8218)	0,80 (0,7384)	0,6 (0,9190)	0,65 (0,8792)	0,74 (0,7825)	0,65 (0,8794)
	27	1,34 (0,8438)	1,07 (0,8438)	1,32 (0,8145)	1,10 (0,6544)	1,86 (0,9762)	1,38 (0,9055)
	36	1,54 (0,9726)	1,18 (0,8750)	1,24 (0,8478)	1,23 (0,8892)	1,50 (0,9593)	1,30 (0,9382)
	49	1,25 (0,90648)	1,17 (0,8975)	1,34 (0,9513)	1,21 (0,8438)	1,85 (0,9990)	1,37 (0,9898)
	57	1,55 (0,9972)	1,19 (0,8438)	1,15 (0,7906)	1,15 (0,8400)	1,40 (0,9932)	1,15 (0,8895)

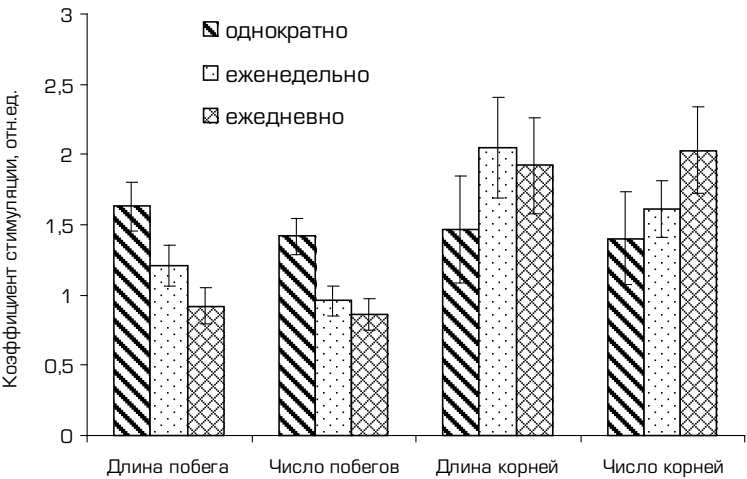


Рисунок 5. Коэффициент стимуляции побегов и корней микрочеренков ежевики Black Satin на среде ризогенеза при различном количестве лазерных облучений. Длительность культивирования 43 дня.

с необлученным контролем и на 40–50 день становится особенно заметным ингибирование формирования новых побегов (на 14–22% меньше, чем в контроле). В то же время, на этой же культуре однократное лазерное облучение вызывает значительный и высокодостоверный прирост и длины (более чем в 1,5 раза) и числа побегов (от 33% до 58%) на всем протяжении культивирования в течение почти 2 месяцев (рис. 4, табл. 2). Представляет интерес также тот факт, что практически на всех режимах и сроках культивирования для обеих культур характерно более выраженная стимуляция роста побегов в длину, нежели их размножения (табл. 2).

Что касается корнеобразования оно, наоборот, усиливается при испытании этих же режимов на среде ризогенеза. Было установлено, что и длина, и число побегов на 43 день культивирования наибольшие для однократного облучения, при этом рост корней усиливался при многократных обработках (рис. 5) — как еженедельных, так и ежедневных (в два и более раз по сравнению с контролем). Полученные результаты, скорее всего, обусловлены сложными процессами синтеза и транспорта гормонов роста, которые по-разному реагируют на периодическое лазерное облучение. На среде размножения избыточное

Таблица 3 — Эффективность циклической лазерной обработки сканирующей полосой микрочеренков малины и ежевики по сравнению с облучением неподвижной полосой шириной 4 мм

Сорт, оцениваемый показатель	Режим сравнения	Изменение показателей в % относительно режима сравнения (достоверность различий)		
	Неподвижная полоса	5 ц/мин	21 ц/мин	42 ц/мин
Малина Оранжевое чудо				
Число побегов, шт.	2,27 ± 0,22	+1,3% (0,550)	+21,7% (0,954)	+7,05% (0,688)
Длина побегов, мм	47,3 ± 5,44	+5,1% (0,636)	+25,4% (0,948)	+20,9% (0,895)
Ежевика Black Satin				
Число побегов, шт.	2,64 ± 0,16	−9,1% (0,876)	−9,1% (0,830)	−14,4% (0,909)
Длина побегов, мм	25,1 ± 1,77	−0,8% (0,563)	+6,0% (0,742)	+1,6% (0,526)

лазерное облучение тормозит транспорт экзогенных цитокининов и гиббереллинов в микрочеренках, что приводит к снижению числа и длины побегов при ежедневной обработке когерентным светом. На среде ризогенеза многократное облучение, наоборот, усиливает синтез эндогенных ауксинов, что приводит к увеличению длины корней их числа. Хотя на данном этапе исследования авторы не располагают собственными прямыми доказательствами для обоснования такой гипотезы, тем не менее, аналогичные труды в растениеводстве показывают решающую роль влияния лазерного излучения на гормональный статус растительных тканей [13, 23, 25] при объяснении влияния когерентного излучения на рост и развитие растений.

Сканирование лазерным пучком широко используется для обработки больших массивов семян и вегетирующих растений [3, 5, 22]. При этом в актуальной зоне происходит чередование световых и темновых фаз. Проверка эффективности такого режима облучения для растений *in vitro* была проведена во второй серии экспериментов. Для этого оценивали в процентах полученный результат по коэффициенту размножения и средней длине побегов на эксплант различных вариантов сканирования по сравнению с непрерывным режимом облучения неподвижной полосой в течение 240 секунд. Ширина неподвижной полосы в актуальной зоне составляла не менее 4 мм. Облучение в стационарном режиме и сканирование полосой проводили в течение 240 секунд. Амплитуда сканирования по вертикальной координате составляла 120 мм (с охватом всей колбы по высоте), а развертка полосы в горизонтальной плоскости — не менее 110 см (с охватом не менее 5–6 стоящих рядом колб). Опыты проводили на микрочеренках ежевики (сорт Black Satin) и малины (сорт Оранжевое чудо), культивируемых на среде размножения. Облучению растения подвергали на третий день после посадки, а оценку результатов осуществляли на 32 день после лазерной обработки (табл. 3).

Анализ данных показывает, что сканирование световой полосой не дает никаких существенных преимуществ по сравнению со стационарным облучением. На малине все режимы сканирования приводят лишь к незначительному приросту показателей, а на ежевике — даже к небольшому (от 9 до 14%), но достоверному ингибированию по числу побегов. Возможно, что такой диаметрально разный результат обусловлен

несколькими причинами. У малины сравнительно невысокий коэффициент размножения в режиме сравнения (неподвижная полоса) — только 2,27, тогда как обычно на 32–34 день культивирования даже у необлученных лазером растений достигает в среднем 2,4–2,6 ед. на эксплант. При этом отмечен достаточно хороший рост побегов в длину. Возможно, сравнительно узкая, 4 мм неподвижная лазерная полоса была неудачно отъюстирована и не захватывала большую часть микрочеренков малины. При сканировании полосой этот недостаток отчасти компенсировался полным охватом всей колбы по вертикали, но этого было явно недостаточно в связи с довольно высокой линейной скоростью лазерного пучка, «скользящего» по поверхности объекта. В актуальной зоне облучения для режима 5 циклов/мин скорость равна 20 мм в секунду, а для 42 циклов/мин — 168 мм в секунду. Таким образом, длительность облучения единичной клетки размером около 20 мкм в режиме сканирования составляет менее 0,001 секунды.

В третьей серии экспериментов исследовали действие пачки коротких (1 с; 7,5 с и 15 с) лазерных импульсов на ростовую реакцию микрочеренков ежевики и малины. Только в отличие от предыдущей серии опытов облучение проводили лазерным пучком, охватывающим всю колбу. Темновой интервал между импульсами выдерживали одинаковый — 30 секунд. В каждом варианте опытов по импульсному облучению было 8 циклов таких свето-темновых периодов. Результаты через каждые 10 дней в течение 30 суток культивирования сравнивали с необлученным контролем (рис. 6).

В этой серии опытов с импульсной засветкой, как и в предыдущих, наибольшая фотоиндуцированная реакция на когерентный свет отмечена у растений ежевики. Так, на 30-й день культивирования, у вариантов 8×1 с и 8×7,5 с число побегов и их длина существенно превышает контрольные показатели (в полтора — два раза). Малина вновь оказалась менее чувствительной к когерентному свету, а также ей требуется большая суммарная доза лазерного воздействия для проявления стимуляционных эффектов. Максимальный прирост показателей составляет чуть более 20% и проявляются они на режимах 8×7,5 с и 8×15 с. Таким образом, импульсный режим лазерной обработки микрочеренков можно рассматривать как наиболее перспективный при разработке технологических регламентов, хотя и требует

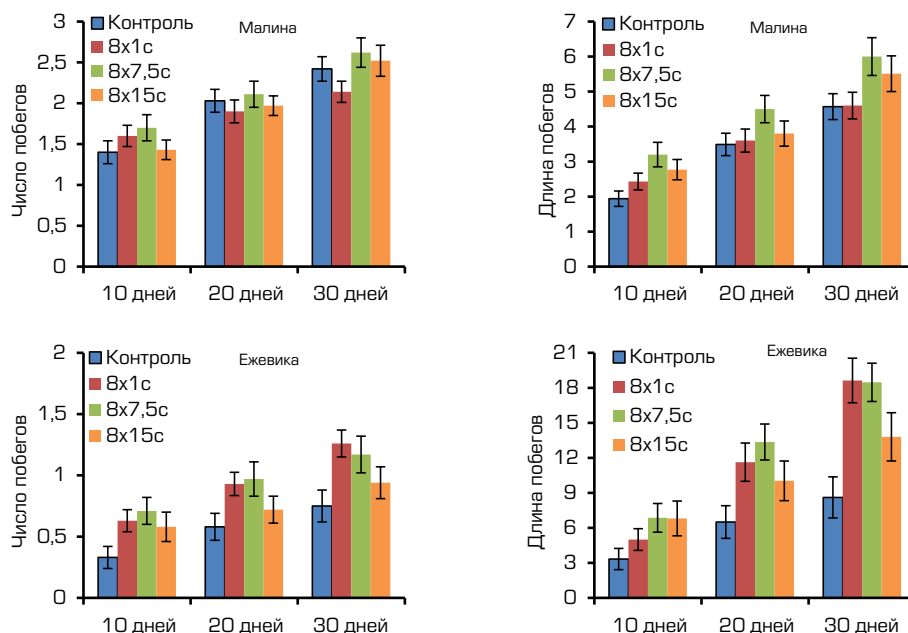


Рисунок 6. Число и длина побегов на экплант микрорастений ежевики и малины в результате импульсного лазерного воздействия

определенной доработки в отношении снижения длительности отдельного импульса и их кратности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа изменения числа и длины микропобегов малины Оранжевое чудо и ежевики Black Satin проведена оценка эффективности различных приемов лазерного воздействия на растения в культуре *in vitro*. Для реализации экспериментов разработана компьютеризированная лазерная установка, позволяющая создавать режим непрерывной, импульсной и сканирующей засветки любой длительности и периодичности.

Показано, что на среде размножения наибольший стимуляционный эффект получен при однократной обработке за весь период вегетации. На среде ризогенеза лучший результат наблюдали при еженедельной или ежедневной лазерной досветке в течение 480 с. Сканирование микрочеренков узкой полосой когерентного света хотя и позволяет облучать большое количество микрорастений, но фотоиндуцированный эффект при этом оказывался низким. Причина может быть связана с недостаточным временем воздействия. Наилучшие результаты обеспечила лазерная обработка микрочеренков короткими импульсами света. Например, у ежевики стимуляционный эффект восьмикратной повторности односекундных импульсов на 14% превзошел вариант с непрерывным световым воздействием и в 2,2 раза необлученный контроль. При этом суммарная длительность облучения (8 с), а соответственно и затраты электроэнергии на этот процесс, уменьшились в 30 раз. Такой режим можно считать биологически эффективным и экономически выгодным.

Проведенные исследования показали, что наилучший результат, как по стимуляции ростовых процессов ежевики и малины красной, так и по энергоэффективности лазерной обработки растений *in vitro*, может быть получен при использовании коротких (1; 7,5 с) импульсов когерентного света красной области спектра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будаговский А. В. Теория и практика лазерной обработки растений. Мичуринск: ВНИИГиСПР, 2008. — 548 с. ISBN 978-5-900665-15-3.
- Даниловских М. Г., Винник Л. И., Летенков О. В., Севостьянова Н. Н. Сканирующее устройство управления лучом лазера для обработки растений в период вегетации // Патент РФ №2732231. Оpub. 14.09.2020. Бюл. №26.
- Даниловских С. М., Даниловских М. Г., Винник Л. И. Способ лазерной обработки растений с беспилотного летательного аппарата // Патент РФ №2740543. Оpub. 15.01.2021. Бюл. №2.
- Ефименко А. В., Монахов Ю. С., Петров А. А. Перспективные конструкции оптико-механических дефлекторов для управления лазерным лучом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. — №28. — С. 68–74.
- Журба П. С., Журба Т. П., Журба Е. П. Способ промышленного возделывания сельскохозяйственных культур с использованием лазерного облучения // Патент РФ №2240663. Оpub. 27.11.2004. Бюл. №33.
- Журба П. С., Журба Т. П., Трещёв Д. Л. Устройство для лазерной обработки семян и растений // Патент РФ №2202869. Оpub. 27.04.2003. Бюл. №12.
- Илиева В. П., Ранков В. П. Применение методов лазерной техники в сельском хозяйстве. Обзор. София: НТС, 1987. — 52 с.
- Красильников В. В., Долговых О. Г., Спиридонов А. Б. Влияние предпосевной обработки семян лазером на урожайность яровой пшеницы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. — №57. — С. 249–255. doi:10.24411/2078-1318-2019-14249
- Максименко А. П., Горбунов И. В., Дзябло Е. П. Применение лазера в декоративном садоводстве // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. — №162. — С. 170–179. doi:10.21515/1990-4665-162-010
- Подвигина О. А., Бартенев И. И., Сащенко С. В. Влияние низкоинтенсивного когерентного излучения на сохранность посадочного материала // Лесотехнический журнал. 2018. — Т. 8. — №4(32). — С. 23–28. doi:10.12737/article_5c1a320e647bd4.28590993.
- Шахов А. А. Фотоэнергетика растений и урожай. М.: Наука, 1993. — 411 с. ISBN 5-02-004182-2
- Abou-Dahab A. D. M., Mohammed T. A., Heikal A. A., Taha L. S., Gabr A. M., Metwally S. A., Ali A. I. *In vitro* laser radiation induces mutation and growth in *Eustoma grandiflorum* plant // Bulletin of the National Research Centre. 2019. — V. 43. — №3. — P. 1–13. doi:10.1186/s42269-018-0036-z
- A El-Kereti M., A El-feky S., S Khater M., A Osman Y., A El-sherbini E. S. ZnO nanofertilizer and He Ne laser irradiation for promoting growth and yield of sweet basil plant // Recent patents on food, nutrition agriculture. 2013. — V.5. — №3. — P. 169–181. doi:10.2174/221279840566613111214251
- Ali S. I., Gaafar A. A., Metwally S. A., Habba I. E. The reactive influences of pre-sowing He-Ne laser seed irradiation and drought stress

- on growth, fatty acids, phenolic ingredients, and antioxidant properties of *Celosia argentea* // *Scientia Horticulturae*. 2020. — V. 261. 108989. doi:10.1016/j.scienta.2019.108989
15. Budagovsky A. V., Solovykh N. V., Budagovskaya O. N., Budagovsky I. A. Response of vegetable organisms to quasi-monochromatic light of different duration, intensity and wavelength // *Quantum electronics*. 2015. — V. 45. — №4. — С. 345–350. doi:10.1070/QE2015v045n04ABEH015502
 16. de Jesus Rivera-Talamantes C. F., Gonzalez-Lopez G., Michtchenko A., Suarez-Calderon J. C. Impact of pre-sowing red laser irradiation of corn seeds on quality and quantity of harvest yield // *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2023. — V. 35. — №4. — P. 326–331. doi: 10.9755/ejfa.2023.v35.i4.3025
 17. Hernandez A. C., Dominguez P. A., Cruz O. A., Ivanov R., Carballo C. A., Zepeda B. R. Laser in agriculture. Review // *International Agrophysics*. 2010. — V. 24. — №4. — P. 407–422.
 18. FernándezValdez J. L., Iglesias-Andreu L. G., Flores-López L. Y. Effect of helium-neon laser irradiations on the *in vitro* culture of *Vanilla planifolia* jacks // *Vegetos*. 2023. — P. 1–9. doi:10.1007/s42535-023-00627-z
 19. Hernández A. C., Rodríguez P. C. L., Domínguez-Pacheco F. A., Hernández A. A. M., Cruz-Orea A., Carballo A. Laser light on the microflora content in maize seeds // *African Journal of Biotechnology*. 2011. — V. 10. — P. 9280–9288. doi:10.5897/AJB11.605
 20. Klimek-Kopyra A., Dłużniewska J., Ślizowska A., Dobrowolski J. W. Impact of coherent laser irradiation on germination and mycoflora of soybean seeds—Innovative and prospective seed quality management // *Agriculture*. 2020. — V. 10. — №8. — P. 314–328. doi:10.3390/agriculture10080314
 21. Maslova M. V., Grosheva E. V. Influence of laser irradiation on state of chlorophyll-containing tissues of apple trees infected with pathogenic bacterium *Pseudomonas Syringae* // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. — P. 845. P.012042. doi: 10.1088/1755-1315/845/1/012042
 22. Murase H., Helm B., Oke S. Investigation of a scanning laser projector as an energy-efficient light source in plant production // *Environmental Control in Biology*. 2015. — V. 53. — №2. — P. 71–76. doi: 10.2525/ecb.53.71
 23. Podleśny J., Stochmal A., Podleśna A., Misiak, L. E. Effect of laser light treatment on some biochemical and physiological processes in seeds and seedlings of white lupine and faba bean // *Plant Growth Regulation*. 2012. — V. 67. — P. 227–233. doi:10.1007/s10725-012-9681-7
 24. Swathy P. S., Joshi M. B., Mahato K. K., Muthusamy A. He-Ne laser irradiation in brinjal leads to metabolic rewiring and accumulation of bioactive components in fruits // *Scientia Horticulturae*. 2023. — V. 322. — P. 112400. doi:10.1016/j.scienta.2023.112400
 25. Swathy P. S., Kiran K. R., Joshi M. B., Mahato K. K., Muthusamy A. He-Ne laser accelerates seed germination by modulating growth hormones and reprogramming metabolism in brinjal // *Scientific reports*. 2021. V. 11. — №1. — P. 7948. doi:10.1038/s41598-021-86984-8
 26. Swathy P. S., Rupal G., Prabhu V., Mahato K. K., Muthusamy A. *In vitro* culture responses, callus growth and organogenetic potential of brinjal (*Solanum melongena* L.) to He-Ne laser irradiation // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2017. — V. 174. — P. 333–341. doi:10.1016/j.jphotobiol.2017.08.017