

Обзорная статья

УДК 631.95 + 8

DOI: 10.7868/S3034530825060093

Лазерные технологии в агробиологии: механизмы биостимуляции и фотоселективность растительных клеток

О.С. Хутинаев[✉], В.И. Старовойтов, О.А. Старовойтова, Н.Э. Шабанов,
Д.С. Боярский, Д.М. Букреев, А.А. Салиев

Олег Сосланбекович Хутинаев

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник
Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха,
Москва, Россия
okosk@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1487-4038>

Виктор Иванович Старовойтов

доктор технических наук, профессор
Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха,
Москва, Россия
agronir1@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>

Оксана Анатольевна Старовойтова

доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник
Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха,
Москва, Россия
agronir2@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>

Низам Эмирсултанович Шабанов

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник
Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха,
Москва, Россия
shaban-sky@mail.ru

Дмитрий Сергеевич Боярский

аспирант
Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха,
Москва, Россия
dmbojarskiy@mail.ru

Дмитрий Михайлович Букреев

аспирант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ

simul_26@mail.ru

Алибек Андреевич Салиев

специалист

ООО «АГРОКРАФТ РУС»

sali579@mail.ru

Аннотация. Лазерный свет оказывает фотоселективное воздействие на растительные клетки, воздействуя на определенные структуры или процессы внутри клеток, способствуя стимуляции или подавлению определенных реакций. Одним из основных механизмов, через который лазерный свет влияет на растения, является фотосинтез. Лазеры могут подаваться на растения в узких спектрах, которые наиболее эффективно поглощаются хлорофиллом и другими пигментами. Этот метод может усилить фотосинтетическую активность, что приводит к увеличению роста и продуктивности растений. Применение лазерной терапии может способствовать ускорению клеточного деления и улучшению фотосинтетических процессов, что в свою очередь усиливает общее состояние растения. Многочисленные исследования показывают, что лазерное облучение может приводить к селективным изменениям в метаболизме растений. Определенные длины волн лазерного света могут активировать или ингибировать синтез различных метаболитов, таких как фитогормоны, которые играют ключевую роль в росте и развитии растений. Это может позволить растениеводам более точно настраивать условия роста, подбирая кратковременные импульсы лазерного света для достижения желаемого эффекта. Тем не менее следует учитывать и риски повреждения тканей растений лазерным светом, так как неумеренное использование лазерного излучения может привести к повреждению клеток или изменению их функций. Поэтому для достижения положительных эффектов крайне важно тщательно изучать оптимальные параметры (длину волн, мощность, продолжительность воздействия), чтобы исключить нежелательные последствия.

Ключевые слова: лазерный свет, фотоселективное воздействие, биостимуляция, растительная клетка, спектр освещения, интенсивность, агробиология

Для цитирования: Хутинаев О.С., Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Шабанов Н.Э., Боярский Д.С., Букреев Д.М., Салиев А.А. Лазерные технологии в агробиологии: механизмы биостимуляции и фотоселективность растительных клеток // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 6. С. 100–119. <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825060093>

Review article

Laser technologies in agrobiology: biostimulation mechanisms and photoselectivity of plant cells

O.S. Khutinaev, V.I. Starovoitov, O.A. Starovoitova, N.E. Shabanov,
D.S. Boyarsky, D.M. Bukreev, A.A. Saliev

Oleg S. Khutinaev

Candidate of Sciences in Agriculture, Senior Researcher

Russian Potato Research Centre, Moscow, Russia

okosk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1487-4038>

Viktor I. Starovoitov

Doctor of Sciences in Technical, Professor
Russian Potato Research Centre, Moscow, Russia
agronir1@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9365-7631>

Oksana A. Starovoitova

Doctor of Sciences in Agricultural, Chief Scientific Officer
Russian Potato Research Centre, Moscow, Russia
agronir1@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8293-6579>

Nizam E. Shabanov

Candidate of Sciences in Agriculture, Senior Researcher,
Russian Potato Research Centre, Moscow, Russia
shaban-sky@mail.ru

Dmitry S. Boyarsky

Graduate student
Russian Potato Research Centre, Moscow, Russia
dmbojarskiy@mail.ru

Dmitry M. Bukreev

Graduate student
Federal Scientific Agroengineering Center VIM
simul_26@mail.ru

Alibek A. Saliev

Specialist
AGROCRAFT RUS LLC
sali579@mail.ru

Abstract. Laser light has a photoselective effect on plant cells, affecting certain structures or processes inside the cells, contributing to the stimulation or suppression of certain reactions. Photosynthesis is one of the main mechanisms through which laser light affects plants. Lasers can be applied to plants in narrow spectra, which are most effectively absorbed by chlorophyll and other pigments. This method can enhance photosynthetic activity, which leads to increased plant growth and productivity. The use of laser therapy can help accelerate cell division and improve photosynthetic processes, which, in turn, enhances the overall condition of the plant. Numerous studies show that laser irradiation can lead to selective changes in plant metabolism. Certain wavelengths of laser light can activate or inhibit the synthesis of various metabolites, such as phytohormones, which play a key role in plant growth and development. This may allow growers to more precisely adjust the growing conditions by selecting short-term pulses of laser light to achieve the desired effect. Nevertheless, the risks of damage to plant tissues by laser light should also be taken into account, since excessive use of laser radiation can damage cells or change their functions. Therefore, in order to achieve positive effects, it is extremely important to carefully study the optimal parameters (wavelength, power, duration of exposure) in order to eliminate undesirable consequences.

Keywords: laser light, photoselective treatment, biostimulation, plant cell, illumination spectrum, illumination intensity, agrobiology

For citation: Khutinaev O.S., Starovoitov V.I., Starovoitova O.A., Shabanov N.E., Boyarsky D.S., Bukreev D.M., Saliev A.A. Laser technologies in agrobiology: biostimulation mechanisms and photoselectivity of plant cells. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(6):100–119. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.7868/S3034530825060093>

Введение

Современное сельское хозяйство становится все более проблемным в связи с появлением новых техногенных угроз, включая изменение климата, деградацию почв, рост резистентности вредителей к пестицидам и необходимость увеличения урожайности при сокращении использования химических препаратов. В этом контексте лазерные технологии представляют собой перспективное направление для стимуляции роста растений и снижения стрессовых факторов, что может способствовать экологизации агропроизводства и повышению его эффективности.

Целью статьи является обзор применения лазерных технологий в секторе сельского хозяйства и какие решения может эта отрасль науки предложить для биостимуляции растительной клетки и в целом на культурные растения.

Представлен обзор существующей литературы. В статье рассматриваются различные лазерные технологии и типы лазеров, широко используемых для биостимуляции тканей растительных культур, а именно гелий-неоновые (He-Ne) и полупроводниковые лазеры. Выделяются проблемы различных систем и определены потенциальные области для будущих исследований.

В рамках поисковых исследований по методам биостимуляции клеточной структуры изучается фотоселективная обработка растительной клетки лазерным светом с целью фотобиомодуляции процессов жизнедеятельности.

С появлением монохромных источников когерентного света и развитием лазерных технологий ученые получили уникальный инструмент для управления процессами роста и развития растений. Этот инновационный метод открыл новые перспективы в агрономии и ботанике, позволив целенаправленно влиять на физиологию растительных клеток. В современном сельскохозяйственном производстве лазерные технологии приобретают особое значение в области биостимуляции растений, ключевыми преимуществами которой являются улучшение всхожести семян и ускорение прорастания, повышение урожайности, усиление устойчивости к таким стрессовым факторам, как засуха, болезни, температурные колебания, оптимизируются метаболические процессы при фотосинтезе и синтезе белков и ферментов. Применение лазерных технологий трансформирует традиционные практики ведения растениеводства, делая их более эффективными и экологически устойчивыми. Точечное воздействие на растительные клетки позволяет минимизировать использование химических стимуляторов, снижая антропогенную нагрузку на экосистемы. Таким образом, лазерная биостимуляция стала перспективным направлением на стыке физики, биологии и агрономии, предлагая научно обоснованные решения для повышения продуктивности растений.

В основу лазерных исследований заложена возможность изменения потенциала биостимуляции растительных клеток, что открывает новые возможности для улучшения характеристик культурных растений и является особенно актуальным в условиях современных реалий, таких как изменение климата. В ранних исследованиях лазерное излучение применялось для обработки семян перед посадкой, после чего фиксировалось значительное повышение урожайности и улучшение качества растительной продукции. Было выявлено, что лазерная обработка позволяет активизировать обмен веществ в семенах, мобилизовать внутренние процессы, содействуя более дружной всхожести, и в дальнейшем способствует более успешному развитию растений, повышению урожайности и улучшению качества продукции [1]. Лазерную обработку можно применять на одной из фенологических стадий развития растений, что может способствовать повышению урожайности и качества сельскохозяйственной продукции [4].

При выращивании растений в искусственных условиях критически важно обеспечить оптимальный спектральный состав освещения. Многочисленные исследования подтверждают, что физиологические процессы и полноценный метаболизм растений наиболее эффективно поддерживаются при освещении красными и синими лучами света. Ю.Н. Кульчин и др. (2025) в исследованиях влияния на развитие микрорастений картофеля монохроматического света красного, зеленого и синего диапазонов спектра с различным уровнем интенсивности облучения ($30-1400 \text{ мкмоль/с} \cdot \text{м}^2$) определил, что наибольшие значения параметров высоты и массы растений наблюдались у образцов, культивированных при крас-

ном свете, а наименьшие – в группах с освещением синим светом. Синий свет ограничивал рост стебля и больше способствовал образованию крупных листьев. Морфометрические показатели растений, выращенных при зеленом свете, были выше, чем культивированных при синем, однако меньше значений образцов из секций с красным светом. Оптимальными для развития микрорастений картофеля были интенсивности освещения: при СС и ЗС – 500–600 мкмоль/с·м², при КС – 800–1000 мкмоль/с·м² [1]. O.V. Nakonechnaya et al. (2021) отметили, что наиболее благоприятным освещением для выращивания ростков картофеля был красно-зелено-синий RGB, а также вариации освещения RGB и RGB-SB при применении динамического освещения [6].

Знание оптимальных спектральных диапазонов освещения позволяет целенаправленно регулировать морфологические процессы растений, что создает основу для применения высокоеффективных лазерных технологий в биостимуляции растений. Исследования стимулирующего воздействия при излучении низкоинтенсивными лазерами проводились в разное время на посевах зерновых, овощных и плодовых культур [1, 6–11]. Ю.А. Югай и др. (2023) установили, что монохроматическое излучение – белый, красный (660 и 630 нм), желтый, зеленый, синий (440 и 460 нм) свет ингибировали рост (до 1,5 раза) и суммарное накопление вторичных метаболитов в клетках *I. batatas* (до 1,8 раза), но при этом белый, яркий синий и красный спектры дифференцировано активировали образование отдельных соединений – 3,4-ди-кофеилхинной кислоты и 3-ферулоил-5-кофеилхинной кислоты. Таким образом, они показали, что наряду с аналогами ауксина, спектральное монохроматическое излучение проявляют различное влияние на ростовые и биосинтетические характеристики культуры [7]. Результаты работ показали, что физиологическое воздействие низкоинтенсивного лазерного излучения на растения может представлять огромный интерес в практике растениеводства для выявления фундаментальных закономерностей влияния света на растительные организмы. В своих исследованиях А.В. Будаговский (2015) на примере различающихся по структурно-функциональным показателям растительных организмов показал зависимость биологического эффекта от длительности облучения и выявил закономерность в спектральных диапазонах, соответствующих фотоконверсии хромопротеидов фоторегуляторных систем, которую он связывает с циклическими изменениями метаболической активности растительных клеток [5].

В ходе исследования стимулирующего воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения на растительные объекты было показано, что даже кратковременное освещение семян и развивающихся растений когерентным лазерным излучением оказывается достаточным для запуска определенных процессов морфогенеза [8, 10]. Стимуляция роста происходит благодаря воздействию лазером красного спектра (длина волны 630–680 нм). Рецепторы на листовой пластине поглощают кванты света, их энергия передается внутрь растительной клетки и запускает синтез АТФ (универсального источника энергии для всех биохимических процессов). В результате ускоряются рост и созревание, растет урожайность, снижается количество свободной воды, повышается содержание сухого вещества. M. Hasan et al. (2020) в своих исследованиях облучали семена при воздействии красного Не–Не-лазера (632,8 нм), зелёного Nd: YAG-лазера второй гармоники (532 нм) и синего диодного лазера (410 нм) и были протестированы четыре разных времени воздействия (45, 65, 85 и 105 с) с разной интенсивностью (2 и 4 мВт/см²) для каждого лазера [8]. Было выявлено, что высота растения при воздействии синим лазером оказалась сравнительно высокой – 211 см при 85 с. Синие и зеленые лазерные лучи значительно увеличили количество рядов на ухе до 39,1 за 85 с и 45 за 65 с соответственно по сравнению с контрольным показателем 36 рядов на ухе. Порядок урожайности семян был синим (7003,4 кг/га) > зеленым (6667,8 кг/га) > красным (6568,01 т/га) на основе различных сроков экспозиции 85, 85 и 105 с соответственно, по сравнению с контролем 6,9 кг/га. Полученные результаты указывают на возможность использования синего лазерного излучения для управления ростом и урожайностью кукурузы [8]. В.С. Филина и др. (2020) также доказали активацию генетического потенциала растений в результате воздействия лазерного излучения и было выявлено возбуждающее действие излучения лазера с длиной волны 650 нм на фитохромы растений [9]. Вследствие 30-секундного облучения

полупроводниковым лазером с длиной волны 650 нм, мощностью излучения 150 мВт происходило ускорение синтеза белка и углеводов, которое приводило к увеличению урожайности. В результате облучения общее количество белка в собранных стеблеплодах кольраби в образцах опытной группы было выше на 6%, углеводов – на 27%, а средняя масса стеблеплода на 30% выше соответствующих показателей образцов контрольной группы [9]. N.N. Sevostyanova et al. (2021) предложили в качестве современного метода повышения урожайности картофеля лазерную стимуляцию растений картофеля под воздействием неионизирующего излучения с длиной волны 650 нм, мощностью излучения 150 МВт, экспозицией 30 с. Такая обработка позволила повысить урожайность на 47%, содержание крахмала – на 28,2%, а сахара – почти в 2 раза. При этом лежкость картофеля также повысилась на 4,3% [10]. В другой работе этого автора Н.Н. Севостьяновой и др. (2021) на примере капусты кольраби был получен положительный эффект применения полупроводникового лазера красного спектра действия с длиной волны 658 нм, при котором наблюдалось увеличение массы стеблеплодов, а также увеличение содержания белков и углеводов [11]. По данным Е.П. Шкодиной и др. (2024), лазерное облучение красным цветом (длина волны – 638 нм, мощность излучения – 300 мВт, экспозиция – несколько секунд) оказало значительный стимулирующий эффект при обработке в ранние фазы развития (всходы – начало кущения). Сообщается, что растения в этот период максимально эффективно использовали ресурс, регулируя процессы анаболизма: урожайность зеленой массы у овса увеличивалась до 86%, у зерна – до 18,7%. При облучении в большинстве вариантов увеличивается содержание сухого вещества в зеленой массе и зерне [12].

Высокоэффективное воздействие лазерного света на стимулирование растений ученые увязывают с тем, что лазерные излучатели позволяют управлять такими длиной волны, интенсивностью, состоянием поляризации, временем экспозиции, дозой и типом облучения (непрерывное или импульсное), что не позволяют сделать обычные источники света [1–3].

Лазерный свет может оказывать мощное фотоселективное воздействие на физиологическое состояния растительной клетки и может оказывать как положительные, так и отрицательные эффекты в зависимости от параметров излучения и состояния клетки. Конкретный результат определяется точным подбором параметров лазерного излучения. Это открывает возможности для использования лазеров в биотехнологии, сельском хозяйстве при предпосевной обработке семян или при стимулировании растений, или при микроманипулировании клетками в научных исследованиях. Воздействие лазерным светом основано на принципах фотоселективности, где конкретные длины волн света взаимодействуют с определенными молекулами, при этом возникает эффект, который можно использовать для различных целей, таких как стимуляция роста и регуляция физиологических процессов. Фотоселективное воздействие лазерного света на растительные клетки – это сложный процесс, при котором лазерное излучение может использоваться для целенаправленного воздействия на определенные структуры или субстанции в клетках растений, но такое воздействие будет сильно зависеть от параметров лазерного излучения, таких как длины волны, интенсивность, экспозиция и т. д. [1].

Одним из основных направлений исследований при изучении фотоселективного воздействия лазерного света на растительную клетку является фотосинтез. Лазерный свет может быть использован для оптимизации условий фотосинтетического процесса. Например, определенные длины волн могут повышать эффективность фотосинтеза за счет более эффективного возбуждения хлорофилла, что позволяет растениям лучше усваивать свет и, следовательно, увеличивать эффективность их роста. Стимуляция роста, улучшение фотосинтетических процессов и возможность целенаправленного уничтожения нежелательных клеток создают перспективы для создания новых методов в ботанике, а, следовательно, и в растениеводстве. С помощью лазерного облучения можно не только стимулировать фотосинтетические процессы, но и активировать в растениях механизмы, ответственные за адаптацию к стрессам, таким как засуха, высокие температуры или инфекции. Снижение стресса достигается благодаря иммуномодулирующему воздействию лазера. Мембранные клеток становятся более устойчивыми к проникновению различных патогенов, как следствие, снижается количество гнили.

Фотоселективная обработка лазерным светом может применяться для осуществления микроманипуляций с растительными клетками, используя приемы одноклеточного облучения, что открывает новые возможности для генетической модификации и исследования клеточных процессов в режиме реального времени. Помимо этого, фотоселективное воздействие может быть также использовано для подавления вредных микроорганизмов или патогенов, не затрагивая при этом здоровые клетки растения.

Лазеры обеспечивают высокоточное облучение и позволяют минимизировать риск повреждения клеток и тканей растения.

Основные эффекты лазерного света на растительные клетки

Современные исследования показывают, что использование лазеров для облучения семян перед посевом может значительно улучшить их прорастание и последующий рост. Лазерное воздействие может активировать фотосинтетические пигменты и даже влиять на гормональный баланс в растениях, способствуя более гармоничному развитию. Кроме того, лазеры могут помочь в повышении устойчивости семян к патогенам и вредителям, минимизируя необходимость в химических пестицидах. Также существует возможность использования лазеров для создания более разнообразных и устойчивых сортов растений через генетическую модификацию. В сочетании с методами редактирования генов, такими как CRISPR*, лазеры могут помочь в оптимизации структурных и функциональных аспектов генетики растений, что позволит создавать сорта с улучшенными характеристиками. Это может привести к появлению растений, способных лучше адаптироваться к меняющимся условиям или обладающих повышенной производительностью.

В современной практике лазерное излучение рассматривается как эффективный способ оптического воздействия на растительную клетку [9, 13–18]. Реагирование растительных клеток на свет происходит за счет резонансного поглощения фотонов специфическими хромопротеидами. При этом каждый хромопротеид возбуждается под действием определенного монохроматического излучения, и остается вопрос, воздействие на какой из хромопротеидов будет давать наибольший стимулирующий эффект [14]. С.И. Юран и др. (2021) выявили, что при воздействии на растительные клетки монохроматическим светом определенного спектрального состава он способен влиять на их функциональную активность [14].

Низкоинтенсивное лазерное излучение оказывает биостимулирующее действие на сельскохозяйственные растения. Это проявляется в ускорении роста и развития, повышении продуктивности и устойчивости к болезням. Многочисленными исследованиями показано, что низкоинтенсивное лазерное излучение оказывает биостимулирующее действие на такие факторы, как ускорение роста и развития – семена быстрее и дружнее всходят, у проростков раньше образуются корни, площадь листьев оказывается большей, а корневая система – разветвленнее [14], повышение продуктивности – увеличивается урожайность сельскохозяйственных культур, раньше созревают плоды, устойчивость к болезням – лазерная стимуляция оказывает иммуномодулирующее воздействие, мембранны клеток становятся более устойчивыми к проникновению различных патогенов, снижается количество гнили, улучшение сохранности урожая. Например, при лазерной обработке семян картофеля и свеклы увеличивается плотность корнеплодов, что повышает их устойчивость к механическим повреждениям при уборке и перевозке [15].

Эффекты лазерного облучения могут варьироваться в зависимости от типа растения, а также от условий его роста, что делает каждое применение уникальным. Большинством исследований выявлена высокая биологическая эффективности низкоинтенсивного когерентного излучения, генерируемого лазерами [9, 13–15]. В основе метода лежит фотосинтез, т.е. образование органического вещества под действием света. Воздействуя на хлорофилл, происходит преобразование света и запуск каскадного механизма биохимических реакций [16]. Ю.Н. Кульчин акцентирует внимание на инновационных методах, которые способны значительно улучшить процессы роста и развития растений, и на потенциальной возможности использования лазеров для защиты растений от патогенов [1]. По его мнению, лазерные технологии могут быть использованы для лечения и предотвращения заболеваний, что снижает необходимость применения химических пестицидов и снижает воздействие

на окружающую среду. В своих работах он отразил результаты влияния интенсивности освещения и различных спектров монохроматического и полихромного излучения на ростовые и биосинтетические характеристики тканей растений, позволившие выявить оптимальные уровни интенсивности освещения в процессе формирования растений [1–3, 6, 7]. Он предположил, что поляризованное лазерное излучение может способствовать более эффективному взаимодействию излучения с фотосинтетическими и фоторецепторными структурами клеток и оказывать влияние на морфологию развития растений, которое часто наблюдается на практике при облучении растений лазерным излучением [3]. Доказано, что использование лазеров в растениеводстве может влиять на рост растений на молекулярном уровне, изменяя активность ферментов и уровень гормонов, которые отвечают за рост и развитие, и лазерное излучение может способствовать улучшению качества урожая, увеличивая содержание полезных веществ, таких как витаминов и антиоксидантов, в растениях [3]. В ходе исследований влияния низкоинтенсивного лазерного излучения на оптическую анизотропию эпидермиса листьев растений выявлено, что растительная клетка обладает оптической активностью, способной приводить к трансформации состояния поляризации лазерного излучения и к изменению характера его взаимодействия с молекулярной системой клетки [3]. В целом из исследований можно проследить демонстрацию мощного потенциала лазерных технологий в повышении эффективности растениеводства, что является особенно актуальным в условиях мировых вызовов, таких как изменение климата и рост численности населения. Тем не менее отмечается, что перед широким применением лазерных технологий необходимо провести дополнительные исследования, чтобы определить оптимальные условия и методы их использования для различных культур.

А.В. Будаговский (2015) в своих исследованиях, изучая воздействие лазера на тканях растений, выявил, что эффект при использовании высоких интенсивностей излучения $100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и более достигается такой же сравнительный эффект лазерной стимуляции, что и при использовании на порядок менее интенсивного излучения ($1\text{--}10 \text{ Вт}/\text{м}^2$). Этот диапазон он выделил как экономический диапазон интенсивности облучения [5]. Данный диапазон складывался из анализа влияния лазерной стимуляции различных интенсивностей в широком интервале: от сотых долей до сотен ватт на квадратный метр. По его мнению, применение излучения низкой интенсивности оправдано с экономической точки зрения, однако использование плотности мощности менее $0,1 \text{ Вт}/\text{м}^2$ затрудняет контроль параметров и положения светового пятна в рабочей зоне, которая при этом нуждается в экранировании от внешней засветки [14]. В то же время, высокая интенсивность излучения ($400\text{--}500 \text{ Вт}/\text{м}^2$) приводит к необратимым повреждениям растительных организмов.

В ходе проведения исследований при изучении лазерного света на растительные ткани разными авторами было выявлено, что эффективность воздействия электромагнитного воздействия зависит от правильного подбора оптических параметров, дозы и времени облучения, а также способа хранения облученного материала [12, 17, 18]. До появления полупроводниковых лазерных устройств, для биостимуляции растительной клетки применяли гелий-неоновые (He-Ne) лазерные установки. Практически все авторы, проводившие исследования с использованием подобных установок, столкнулись с тем, что промышленное применение подобного оборудования слишком затруднено ввиду больших размеров и энергозатрат [19]. Для использования в практических целях наиболее интересными являются небольшие универсальные лазерные источники, которые позволяют с такой же эффективностью проводить облучение, и более того, в таких устройствах есть возможность автоматического или ручного управления исходящим лучом лазера. Современные гелий-неоновые лазеры (He-Ne -лазер) представлены небольшим инструментами для широкого применения в научных исследованиях. Они в основном используются на длине волны 632,8 нм в красном диапазоне видимого спектра*.

Линия красных гелий-неоновых лазеров от Thorlabs имеет стабильные выходные мощности от 0,5 до 35 мВт, в основе используется гауссов луч. В зависимости от выбранной

* Из открытых ресурсов интернета. URL: https://inscience.ru/library/article_post/ ispolzovaniye-geliy-neonovykh-he-ne-lazerov-v-nauchnykh-issledovaniyakh. Дата публикации: 08.05.2018 07:00.

модели выходной луч либо линейно поляризован, либо поляризован случайным образом, либо неполяризован. Неполяризованные лазеры идеально подходят для экспериментов, где нет поляризующих элементов. Форма поляризованного излучения Не–Не-лазера – линейная, благодаря чему эти устройства становятся идеальными инструментами для проведения экспериментов, где имеет значение форма поляризации*.

Выявлено, что лазерное облучение оказывает влияние на растительную клетку в виде фотохимического, фототермического, фотомеханического и биологического воздействия**.

Фотохимическое воздействие является основным механизмом воздействия в видимой области спектра. К основным примерам фотохимического механизма воздействия относятся ФОТОСИНТЕЗ и ФОТОМОРФОГЕНЕЗ. Фотосинтез – один из примеров фотохимических реакций, в результате которого из низкомолекулярных соединений образуются углеводы. Он проходит в растениях в результате реакции между диоксидом углерода и водой под действием света в присутствии катализатора хлорофилла**.

Фототермическое воздействие – это когда поглощенная энергия преобразуется в тепло [20]. Такой эффект происходит при использовании лазерного излучения, вызывая нагрев тканей. Фототермические процессы в зависимости от плотности мощности и времени воздействия лазерного излучения разделяют на Фотокоагуляцию, когда биоткань нагревается до температуры +60°C при экспозиции 10–1…102 с и приводит к денатурации белка (протеина) в клетках [23] и Фотоиспарение, когда биоткань нагревается до температуры +100°C и более при экспозиции 10–3…10 с и приводит к вскипанию и испарению внутриклеточной воды, а, следовательно, к разрушению клетки [202]. Эффект зависит от интенсивности и длительности облучения – умеренный нагрев может ускорять метаболические процессы, а сильный нагрев приводит к денатурации белков, повреждению мембран, коагуляции цитоплазмы и гибели клетки.

Фотомеханическое воздействие и фотоакустический эффект возникают при использовании лазеров с короткими импульсами и с высокой пиковой мощностью. Фотомеханический эффект наступает, когда за короткий промежуток времени поступает большой поток энергии (например, высокомощное лазерное излучение), что приводит к значительному механическому напряжению внутри ткани и в результате распространяется волна с разрушающим действием, влекущим за собой разрыв эпидермиса, клеток, молекул [21]. Фотоакустический эффект наблюдается при поглощении импульсного лазерного излучения, приводящем к нагреву и возникновению термоупругих расширений, которые в свою очередь возбуждают ультразвуковые акустические волны в среде, окружающей область поглощения света***.

Быстрое поглощение энергии ведет к локальному перегреву, испарению воды, образованию плазмы и возникновению ударных волн, которые могут механически разрушать клеточные структуры (используется для микрохирургии клетки, перфорации оболочек).

Биологическое воздействие выражается в таких механизмах воздействия, как:

– стимулирование или фотобиомодуляция (при низких дозах) – ускорение прорастания семян, усиление роста корней и побегов, повышение интенсивности фотосинтеза и накопления биомассы, активация синтеза белков и ферментов, повышение устойчивости к стрессовым факторам (засуха, засоление, патогены), ускорение клеточного деления и дифференциации (в культуре тканей) [22–24];

– ингибирующие и повреждающие (при высоких дозах или определенных длинах волн, например, УФ) – подавление роста, снижение интенсивности фотосинтеза (фотоингибиция), повреждение ДНК (особенно УФ-лазерами), приводящее к мутациям или гибели клетки, образование активных форм кислорода (АФК), вызывающих окислительный стресс, повреждение клеточных мембран, нарушение их проницаемости, деградация хлорофилла, денатурация белков, некроз или апоптоз (программируемая клеточная гибель)^{4*}, ^{5*};

* Из ресурсов интернета. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотохимические_реакции

** Из ресурсов интернета. URL: <https://moluch.ru/archive/368/82715/>

*** Из ресурсов интернета. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотоингибирование>

^{4*} Из ресурсов интернета. URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Фотоингибирование>. Дударева Л.В. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на процессы роста и развития в растительной ткани. Иркутск, 2004. С. 9.

– структурные изменения – изменение проницаемости клеточной стенки и мембраны (используется для введения веществ в клетку – лазеропорация) [30], локальное разрушение или удаление частей клетки (лазерная микродиссекция, абляция).

В растениеводстве лазеры могут найти широкое применение при предпосевной обработке семян для ускорения прорастания, в биотехнологии – для стимуляции клеточных культур *in vitro*, а также в экологическом аспекте с целью повышения устойчивости растений к стрессам (засуха, засоление). Лазерная обработка семян считается экологически чистой технологией, которая позволяет добиться результата без применения химических средств защиты растений или при значительном снижении объема их использования [25]. Ключевую роль в поглощение света играют такие пигменты клетки, как хлорофиллы, поглощающие свет в синей и красной областях спектра, каротиноиды, поглощающие свет в сине-зеленой области, фитохромы – красный/дальний и красный свет, криптохромы – синий и УФ-А свет, flavины и другие хромофоры, поглощающие свет в разных областях спектра. Нужно отметить и то, что вода в клеточном соке также поглощает свет, особенно в инфракрасной области, что может приводить к тепловым эффектам. Выбор длины волны лазера определяет, какие молекулы будут преимущественно поглощать энергию и какие процессы будут запущены.

Оптимальные параметры зависят от вида растения, но с точки зрения фотосинтеза и скорости прохождения фотосинтетических реакций [5, 17]. Наиболее вероятными параметрами лазерных источников облучения являются длина волны 630–680 нм (красный) или 450–470 нм (синий), интенсивность 1–100 мВт/см² и экспозиция – от секунд до минут. Лазерный свет является мощным инструментом для управления ростом растений, но требует точного подбора параметров во избежание повреждений [2].

Влияние гелий-неоновых лазеров (632,8 нм – красный свет) на продуктивность картофеля

Гелий-неоновые (He–Ne) лазеры, излучающие красный свет с длиной волны 632,8 нм, оказывают положительное влияние на продуктивность картофеля, воздействуя на физиологические и биохимические процессы растения* [5].

Основные эффекты He–Ne лазера на картофель можно отметить в следующих преимуществах лазерной обработки:

– стимуляция роста и развития – ускорение прорастания (предпосевная обработка клубней He–Ne лазером повышает активность ферментов (α -амилазы), что ускоряет пробуждение глазков и рост побегов), увеличение числа стеблей (из открытых источников сети отмечалось усиление кустистости, что соответственно может привести к большему количеству клубней), развитие корневой системы (лазерная обработка стимулирует рост корней, улучшая поглощение воды и питательных веществ);

– повышение фотосинтетической активности – активация хлорофилла (красный свет (632,8 нм) близок к пику поглощения хлорофилла *a* (660 нм), что усиливает фотосинтез и накопление углеводов), увеличение содержания крахмала (благодаря усиленному фотосинтезу в клубнях накапливается больше крахмала, что повышает их питательную ценность);

– увеличение урожайности (из открытых источников сети отмечалось увеличение массы клубней картофеля с одного растения на 10–25%, повышение товарности картофеля (уменьшается доля мелких);

– улучшение биохимического состава – увеличение содержания витамина С, являющегося важным антиоксидантом, снижение уровня нитратов (особенно в комбинации с агрообработками), увеличение антиоксидантной активности (улучшает лежкость клубней);

– повышение устойчивости к стрессам – усиление иммунитета (активируются защитные механизмы, снижается восприимчивость к фитофторозу и другим болезням), лучшая засухоустойчивость (растения эффективнее используют воду).

Обычно применяют облучение мощностью 1–10 мВт/см² в течение 1–10 минут (зависит от сорта и состояния клубней)* [5]. Метод обработки может быть в вариантах:

- предпосевная обработка (облучение семенных клубней перед посадкой);
- обработка ростков (на ранних стадиях вегетации);

– комбинация с другими методами. Эффект усиливается при совместном использовании с биопрепаратами или минеральными удобрениями.

Гелий-неоновый (He–Ne) лазер (632,8 нм) оказывает эффективное воздействие на повышение продуктивности картофеля в плане стимулирования роста, улучшения фотосинтеза, увеличения урожайности и качества клубней. Однако для массового применения необходима точная настройка параметров облучения под конкретные сорта и условия выращивания [26, 27, 28].

Влияние полупроводниковых лазеров (650–850 нм) на продуктивность картофеля

Наиболее широко применяемыми в самых разных областях полупроводниковыми лазерами являются лазеры в диапазоне мощности от 5 до 1000 мВт (1 Вт). По типу излучения и мощности их можно разделить на три основные группы по примерной мощности и областям применения:

1. Лазеры малой мощности (5–50 мВт):

– лазерные указки (красные) – классические указки, обычно около 5 мВт (класс 3R), используются для презентаций;

– лазерные указки (зеленые, маломощные) – часто DPSS-лазеры, могут быть от 5 до 20–30 мВт, они более яркие, чем красные при той же мощности;

– лазерные модули для выравнивания и позиционирования – используются в строительных уровнях, инструментах, швейных машинах (линии разметки), мощность обычно 5–10 мВт;

– считающие головки CD/DVD-плееров – красные или инфракрасные (ИК) диодные лазеры, мощность для чтения и записи в DVD-RW может доходить до 200–300 мВт, но это импульсный режим, для простого чтения CD – около 5 мВт;

– баркод-сканеры – обычно красные диодные лазеры малой мощности (5–10 мВт);

– некоторые медицинские приборы для низкоинтенсивной лазерной терапии (LLLT) – например, для стимуляции заживления, снятия боли, могут использовать красные или ИК-лазеры мощностью 5–50 мВт;

– оптоволоконные системы связи (передатчики) – некоторые ИК-лазеры для коротких дистанций.

2. Средняя мощность (50–300 мВт):

– более мощные лазерные указки (зеленые, синие, фиолетовые), мощность 50–200 мВт (опасны для зрения);

– лазерные модули для любительской гравировки (очень легкие материалы), обычно это диодные лазеры (синие или фиолетовые);

– лазеры для световых шоу (небольшие домашние или клубные инсталляции) – часто используются DPSS (зеленые) или диодные (синие, красные) лазеры;

– некоторые лабораторные лазеры для экспериментов по оптике;

– записывающие головки Blu-ray дисков – сине-фиолетовые лазеры (405 нм), мощность может достигать 100–250 мВт в импульсном режиме.

3. Повышенная мощность (300–1000 мВт/1 Вт):

– лазерные модули для ЧПУ-граверов/резаков – синие диодные лазеры (445–450 нм), мощности 500 мВт, 1000 мВт (1 Вт) и выше, применяются для гравировки дерева, пластика, кожи, для резки тонкой фанеры, картона, цветного акрила;

– DPSS лазеры (чаще зеленые 532 нм) – мощностью 300–1000 мВт могут использоваться в более продвинутых световых шоу, научных исследованиях;

– инфракрасные (ИК) диодные лазеры – используются для подсветки систем ночного видения (808, 850, 980 нм), для накачки других лазеров (например, 808 нм для DPSS), для локального нагрева в специфических процессах;

– лазеры для некоторых медицинских процедур – используются, например, в стоматологии для отбеливания или операций на мягких тканях в дерматологии.

В настоящее время с развитием новых современных технологий стали широко применяться полупроводниковые (диодные) лазеры, работающие в диапазоне 650–850 нм

(красный и ближний инфракрасный свет). За счет более широкой и легкой доступности, а главное гораздо более низкой стоимости, они становятся более привлекательными в применении и в научных исследованиях. Полупроводниковые лазеры стали активно исследоваться в сельском хозяйстве как эффективный способ стимуляции роста растений, включая картофель [29–31]. Воздействие полупроводниковых лазеров на растительную клетку в основном связано с активацией фотосинтетических пигментов и регуляцией метаболических процессов.

Основные эффекты облучения полупроводниковыми лазерами, полученные в исследованиях на культуре картофеля, были получены в следующих явлениях:

– стимуляция прорастания и роста – из открытых источников сети отмечалось, что наблюдается ускорение пробуждения глазков и значительное увеличение скорости прорастания на 15–30%, появляется возможность активировать деление клеток за счет усиления синтеза фитогормонов (ауксинов, цитокининов), улучшается развитие корневой системы, что может приводить к увеличению массы корней на 20–40%;

– повышение фотосинтетической активности – красный свет (650–680 нм) близкий к пику поглощения хлорофилла а (660 нм), усиливает фотосинтез ближний ИК-свет (700–850 нм), улучшает энергетический обмен в клетках, в результате увеличивается накопление крахмала в клубнях на 5–15%^{6*};

– увеличение урожайности – из открытых источников сети в исследованиях отмечается прирост урожая на 10–30% в зависимости от сорта и режима облучения, увеличивается количество клубней на куст (особенно товарной фракции);

– улучшение биохимического состава – из открытых источников сети отмечается повышение содержания витамина С на 10–25%, происходит снижение уровня нитратов (при правильной дозировке), увеличивается антиоксидантная активность, что является весьма полезным для хранения, усиливается устойчивости к засухе, лучше удерживается вода, снижается восприимчивость к фитофторозу и парше за счет активации защитных механизмов.

Если сравнивать полупроводниковые и гелий-неоновые (He–Ne) лазеры, то можно отметить, что полупроводниковые лазеры более предпочтительны как по стоимости, так и по универсальности излучаемой оптической энергии, так как испускаемые лучи полупроводниковых лазеров можно регулировать в широком диапазоне спектра и, в отличие от гелий-неоновых, излучающих свет с длиной волны 632,8 нм, полупроводниковые могут испускать монохромный свет с регулированием в более широком диапазоне в разных диапазонах спектра. Наиболее изученные на сегодняшний день гелий-неоновые (He–Ne) лазеры (632,8 нм – красный свет) применяются в основном для биостимуляции и запуска важных активизирующих процессов и ускорения метаболизма*. Однако в плане бактерицидного воздействия наиболее эффективным для дезинфекции оказались полупроводниковые УФ-лазеры [32–35], однако нужно всегда помнить, что высокая доза УФ излучения может приводить к повреждениям ткани. Исследования полупроводниковых лазеров определили оптимальные параметры обработки – ДЛИНА ВОЛНЫ 650–680 нм (максимум для фотосинтеза), 730–850 нм (для регуляции роста) МОЩНОСТЬ – 5–50 мВт/см² (зависит от цели), ЭКСПОЗИЦИЯ 1–10 минут (для семенных клубней), 5–15 мин (для вегетирующих растений) ЧАСТОТА – импульсный режим (например, 1–100 Гц) может быть эффективнее постоянного излучения [15]^{7*, 8*, 9*}.

Проводя сравнительный анализ упоминаемых в данной статье лазеров, можно обозначить следующие отличительные признаки и параметры воздействия, по которым можно выбрать более предпочтительные устройства в тех или иных исследованиях.

^{6*} Из ресурсов интернета. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эффект_Эмерсона

^{7*} Из ресурсов интернета. URL: <https://alterage.ru/index.php/alternativnye-resheniya/alternativnoe>. Из ресурсов интернета. URL: zemledelie/osveshchenie-dlya-zakrytogo-grunta/115-nuzhnyj-spektr-dlya-rastenij

^{8*} Из ресурсов интернета. URL: <https://novbiotech.ru/news/novbiotekh-predlozhil-obrabatyvat-selkhozkultury-lazerom-s-vozdukha-dlya-urozhaynosti.html>

^{9*} Из ресурсов интернета. URL: <https://лазер.рф/2023/03/15/25114/>

– Не–Не лазер (632,8 нм) – эффективность хорошая, но узкий спектр, стоимость дороже, чем полупроводниковых, и сложнее в обслуживании, глубина проникновения меньше, чем у полупроводниковых, воздействие поверхностное;

– полупроводниковый лазер (650–850 нм) – более широкий, чем у Не–Не лазеров диапазон, можно подбирать под конкретные задачи, по стоимости дешевле, компактнее, удобнее в мобильных условиях, лучи ИК-диапазона глубже и лучше проникают в ткани.

Можно предположить, что полупроводниковые лазеры найдут гораздо большее применение в производстве и исследовательских программах по причине того, что по характеру воздействия на ткани и клеточные структуры они имеют неоспоримые преимущества перед гелий–неоновыми (Не–Не) лазерами. Однако гелий–неоновые лазеры имеют более уникальную особенность испускания луча с более качественным когерентным и поляризованным светом. Полупроводниковые лазеры тоже могут испускать когерентный и поляризованный свет, но с некоторыми особенностями. Полупроводниковые лазеры генерируют когерентное излучение за счет стимулированного излучения в активной среде (например, в р-п-переходе), но их когерентность обычно ниже, чем у газовых или твердотельных лазеров, из-за влияния температурных и токовых флуктуаций и большей ширины спектра, особенно у лазерных диодов без внешнего резонатора.

Практическое использование полупроводниковые лазеры (650–850 нм) могут найти в предпосевной обработке клубней при облучении перед посадкой в целях ускорения прорастания и повышения энергии роста, при обработке вегетирующих растений на стадии бутонизации может увеличить количество клубней и в послесборочной обработке с целью уменьшения прорастания при хранении (при использовании ИК-лазеров). Полупроводниковые лазеры (650–850 нм) являются перспективным инструментом для повышения урожайности картофеля, они гораздо дешевле и удобнее в применении, чем Не–Не лазеры. Они гибче в настройке и позволяют подбирать длину волны под конкретные задачи. В плане эффективности при правильном применении дают стабильный прирост урожая (10–30%).

Оптимальным решением при применении полупроводниковых лазеров для комплексной стимуляции роста и фотосинтеза могла бы быть комбинация красного (650–680 нм) и ближнего ИК-света (730–850 нм), однако в открытых источниках Интернета нет однозначного подтверждения подобной теории, что комбинация красного и ближнего ИК-света является оптимальным подходом при применении полупроводниковых лазеров для комплексной стимуляции роста и фотосинтеза.

Однако есть некоторые сведения о влиянии отдельных спектров света на растения, на основании которых можно сделать такой вывод. Так, Т.Э. Кулешова и др. (2022) выявили, что красный свет имеет высокую относительную квантовую эффективность фотосинтеза и вызывает прибавку сухой массы, разрастание корневой системы, удлинение стеблей, увеличение площади листовой поверхности. Синий свет воздействует на рост растения в целом, разрастание листьев, открытие устьиц, накопление пигментов. Дальний красный свет может существенно повлиять на рост и морфологию растений [36]. Принимая во внимание результаты их исследований, можно заключить, что комплексная обработка красным и дальним красным светом могла бы усилить все процессы метаболизма, которые они вызывают при обособленном применении.

Влияние УФ-лазеров на продуктивность картофеля

Ультрафиолетовые (УФ) лазеры (обычно 200–400 нм) оказывают двойственное воздействие на картофель [37]. Воздействие УФ на паршу серебристую и паршу обыкновенную эффективно, и максимального эффекта также нужно искать в дозах более 15 кДж/м² [37]. В малых дозах УФ лучи стимулируют защитные механизмы и рост, а в высоких – могут повреждать ткани. Их применение требует точного контроля дозировки [38]. Следуя данным многочисленных исследований, можно выделить основные эффекты УФ-лазеров на картофель.

Положительные эффекты УФ облучения (при умеренном УФ воздействии)

- Активация защитных систем растения – УФ-свет (280–320 нм, UV-B) запускает синтез фенолов, флавоноидов и фитоалексинов, повышая устойчивость к болезням (фитофтороз, парша), увеличивается выработка антиоксидантов, что улучшает лежкость клубней.
- Стимуляция роста (в малых дозах) – кратковременное УФ-воздействие (UV-A, 315–400 нм) может ускорять деление клеток и усиливать фотосинтез. Из открытых источников информации в сети в некоторых исследованиях отмечается увеличение массы клубней на 5–15% [37, 38].
- Подавление патогенов – УФ-С (100–280 нм) обладает бактерицидным и фунгицидным действием, снижая риск заражения клубней при хранении [36–38].

Отрицательные эффекты УФ облучения (при передозировке)

- Замедление роста – избыток УФ повреждает ДНК и белки, угнетая развитие.
 - Ожоги листьев и клубней – особенно чувствительны молодые растения.
 - Снижение фотосинтеза – УФ-В разрушает хлорофилл и угнетает работу фотосистем.
- Исходя из вышеперечисленных сведений можно выявить наиболее оптимальные параметры воздействия УФ излучения для применения в исследовательских программах:
- оптимальные параметры диапазона длин волн: UV-A (315–400 нм) для стимуляции, UV-B (280–315 нм) для защиты, UV-C (100–280 нм) для дезинфекции;
 - мощность: 0,1–5 мВт/см² (более высокие дозы опасны!);
 - время экспозиции: от секунды до нескольких минут (зависит от цели);
 - метод обработки: короткие импульсы (непрерывное УФ-излучение повреждает ткани).
- Практическое применение УФ лазеры могут найти при обработке семенных клубней перед посадкой:
- UVA (365 нм) излучение в малых дозах стимулирует прорастание;
 - UVC (254 нм) излучение убивает поверхностные патогены, но требует осторожности;
 - UVB (280–315 нм) излучение кратковременное повышает устойчивость к болезням и стрессообразующим факторам среды.

Избыток УФ снижает урожайность, поэтому важно дозировать и соблюдать время экспозиции. УФ облучение может давать высокий эффект при обработке вегетирующих растений. Особо эффективным решением в плане дезинфекции может оказаться послеуборочная обработка продукции с помощью УФ-излучателей, принимая во внимание то, что UVC применяется для дезинфекции перед хранением (убивает грибки и бактерии), а UVA может замедлять прорастание семян и товарной овощной продукции при хранении.

Выводы

Сравнительный анализ полупроводниковых лазерных излучателей позволяет выделить особо значимые стороны метода биостимуляции лазерным светом и определить, когда и для каких целей можно использовать тот или иной тип лазера для стимулирования процессов метаболизма в тканях растительных культур.

Полупроводниковые лазеры (диодные лазеры) широко применяются в биостимуляции растений благодаря их компактности, энергоэффективности и возможности точного подбора длины волны. Разные типы лазеров (красные, синие, зеленые, инфракрасные) оказывают различное влияние на рост, метаболизм и генетику растений:

- красные лазеры (630–670 нм) наиболее универсальны для стимуляции роста и урожайности;
 - синие лазеры (440–480 нм) лучше подходят для управления морфогенезом и качеством цветков;
 - комбинированное облучение (красный + синий) может давать синергетический эффект;
 - инфракрасные лазеры требуют осторожного применения из-за теплового воздействия.
- Красные и ИК-лазеры применяются для стимуляции роста и фотосинтеза, риски минимальные (при правильных дозах), рекомендуются для увеличения урожайности.

УФ-лазеры применяются для активации защиты и дезинфекции, риск повреждения тканей, наблюдается угнетение роста, рекомендуются для обработки перед хранением и защиты от болезней.

УФ-лазеры не являются основным инструментом для повышения урожайности (в отличие от красных/ИК-лазеров), но они полезны для дезинфекции (UV-C), усиления устойчивости к болезням (UV-B), контроля прорастания при хранении (UV-A). При правильном применении УФ-лазеры могут стать частью интегрированной системы защиты и стимуляции картофеля.

В производстве наиболее оптимальное использование УФ излучения осуществляется в комбинации с красным и ИК-светом (например, предпосевная обработка UV-A + 660 нм для стимуляции роста и защиты). При этом необходимо соблюдать осторожность и избегать передозировки, так как УФ легко повреждает ткани растений.

Практическое применение лазерные источники могут найти практически во всех сферах сельскохозяйственного производства и особенно в таких мероприятиях, как обработка семенного картофеля перед посадкой для повышения всхожести. В биотехнологии лазерный свет можно использовать в лабораторных условиях для ускорения роста *in vitro*.

Фотоселективность тканей и клеточных структур растений при воздействии лазерного света дает возможность его применения для биостимуляции процессов роста и развития растительных культур и в сочетании с традиционными методами ухода за растениями может значительно повысить урожайность и устойчивость культур к неблагоприятным условиям окружающей среды.

В целях усиления фотосинтеза лазерный свет (особенно красный и ближний инфракрасный диапазоны) может усиливать активность хлорофилла, что повышает продуктивность растений.

При предпосевной обработке семян лазерное облучение семенных клубней перед посадкой может ускорять процессы метаболизма. Ожидается более быстрое и дружное прорастание глазков, быстрое появление всходов, ускорение начального роста, увеличение зеленой массы, потенциальное увеличение урожая.

В отношении накопления полезных веществ и снижения нитратов лазерная обработка может способствовать увеличению содержания крахмала, витаминов (например, витамина С) и антиоксидантов в картофеле.

В отношении нитратов может наблюдаться уменьшение их концентрации в клубнях.

Лазерная обработка оказывает положительное воздействие на изменение качества семян и конечной продукции.

При хранении продукции лазерная обработка может замедлять прорастание клубней при хранении.

Во время хранения лазерная обработка может применяться с целью подавления прорастания и в качестве альтернативы поверхностной дезинфекции.

С помощью лазерных технологий можно автоматизировать сортировку в комбинации очисткой.

Лазерная обработка может увеличить устойчивость к болезням и стрессам и активацию защитных механизмов.

Лазерное излучение может стимулировать выработку фитоалексинов и других защитных соединений, повышая устойчивость к грибковым и бактериальным инфекциям.

Улучшается стрессоустойчивость, переносимость засухи, легче переносятся перепады температур и другие неблагоприятные условия.

Лазерные технологии позволяют проводить анализ качества методом неразрушающего контроля клубней, основанные на лазерной спектроскопии с целью обнаружение внутренних дефектов.

Лазерные технологии открывают в растениеводстве новые горизонты для изучения и оптимизации фотосинтетических процессов, что может привести к более эффективному и устойчивому сельскому хозяйству. При правильном подборе параметров (длина волны, мощность, время экспозиции) лазерный свет может быть эффективным инструментом для повышения урожайности и качества картофеля. Лазеры могут играть важную роль в контроле за ростом растений на разных стадиях их развития и обеспечивают высокоточное облучение и минимизи-

ровать риск повреждения клеток и тканей растения, что делает их мощным инструментом для оптимизации роста и повышения устойчивости растений к различным стрессовым факторам.

Интеграция лазерных технологий в практику растениеводства поможет создать устойчивые и продуктивные системы, которые смогут удовлетворить растущие потребности населения, обеспечивая при этом бережное отношение к окружающей среде. Это особенно важно в условиях изменения климата, когда растения сталкиваются с новыми вызовами и угрозами.

Рекомендация

Несмотря на многообещающие перспективы, необходимо учитывать потенциальные риски, так как использование лазерных технологий требует тщательного контроля и понимания механизмов их действия на клеточном уровне.

Необходимы продолжительные исследования, чтобы гарантировать, что такие методы не приведут к непредсказуемым изменениям в экосистемах.

Для достижения целей потребуется максимально полное понимание всех аспектов воздействия лазеров на биологические системы и дальнейшие исследования для минимизации рисков и достижения оптимальных результатов.

Для массового применения в сельском хозяйстве оптимальны диодные лазеры с регулируемой длиной волны и мощностью 5–20 мВт.

Перед масштабированием технологии необходимы испытания на конкретных культурах.

Примечание

Метод редактирования генов CRISPR (Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) представляет собой инновационную технологию, позволяющую проводить точные изменения в генетическом коде живых организмов. Основная идея CRISPR заключается в использовании специально разработанных молекул, которые могут нацеливаться на конкретные участки ДНК и изменять их.

Ключевыми компонентами этой технологии являются белок Cas9 и направляющая РНК (gRNA). Направляющая РНК распознает специфическую последовательность ДНК, которую необходимо редактировать, а Cas9 действует как «ножницы», разрезая цепочку ДНК в указанном месте. После этого клетка может сама исправить повреждение, вводя изменения, которые мы хотим внедрить.

Этот метод позволяет ученым не только удалять или изменять уже существующие гены, но и интегрировать новые генетические конструкции, что открывает широкие перспективы в медицине, агрономии и экологии. Например, с помощью CRISPR можно создавать трансгенные культуры с заданными свойствами, разрабатывать новые методы терапии генетических заболеваний, а также изучать функции отдельных генов, что имеет большое значение в генетических исследованиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кульчин Ю.Н., Гафицкая И.В., Наконечная О.В., Кожанов С.О., Холин А.С., Субботин Е.П., Субботина Н.И. Влияние спектрального состава и интенсивности света на развитие микрорастений *Solanum tuberosum* L. // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 1 (239). С. 19–30.
2. Кульчин Ю.Н., Субботин Е.П., Кожанов С.О., Холин А.С., Субботина Н.И. Эффект измерения состояния поляризации лазерного излучения, проходящего через листья растений / Оптические методы исследования потоков: труды XVII Международной научно-технической конференции. М., 2023. С. 562–572.
3. Кульчин Ю.Н., Субботин Е.П., Холин А.С., Кожанов С.О., Демидчик В.В., Трофимов Ю.В., Ковалевский К.В., Субботина Н.И., Гомольский А.С. Влияние эпидермиса листьев растений на эффективность их взаимодействия с низкоинтенсивным лазерным излучением // Квантовая электроника. 2023. Т. 53. № 1. С. 79–87.
4. Hernandez A.C., Dominguez P.A., Cruz O.A., Ivanov R., Carballo C.A., Zepeda B.R. // Int. Agrophys. 2010. Vol. 24. P. 407.

5. Будаговский А.В., Соловых Н.В., Будаговская О.Н., Будаговский И.А. Реакция растительных организмов на воздействие квазимохроматического света с различной длительностью, интенсивностью и длиной волны // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 4. С. 345–350.
6. Nakonechnaya O.V., Subbotin E.P., Grishchenko O.V., Gafitskaya I.V., Orlovskaya I. Yu., Kholin A.S., Goltsova D.O., Subbotina N.I., Bulgakov V.P., Kulchin Yu.N. In vitro potato plantlet development under different polychromatic LED spectra and dynamic illumination Botanica Pacifica // Journal of Plant Science and Conservation. 2021. Vol. 10. No. 1. С. 69–74.
7. Югай Ю.А., Грищенко О.В., Васюткина Е.А., Григорчук В.П., Чухломина Е.Н., Цыденешшиева Ж.Л., Кудинова О.Д., Ярошенко Ю.Л., Дегтяренко А.И., Субботин Е.П., Булгаков В.П., Кульчин Ю.Н., Шкырль Ю.Н. Влияние регуляторов роста и различных спектров монохроматического излучения на ростовые и биосинтетические характеристики каллусной культуры *Ipomoeabatatas* (L.) Lam. // Физиология растений. 2023. Т. 70. № 7. С. 811–822.
8. Hasan M., Hanafiah M.M., Taha Z.A., AlHilfy I.H., Said M.N.M. // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. P. 1189. DOI: 10.3390/app10031189.
9. Филина В.С., Севостьянова Н.Н., Даниловских М.Г. Применение лазерного излучения для стимуляции роста растений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 767–769. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-767-769.
10. Sevostyanova N.N., Tiranova L.V., Avdeev E.A. Study of laser radiation effect on quality of forage potatoes / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Innovative Technologies in Agroindustrial, Forestry and Chemical Complexes and Environmental Management, ITAFCCSEM 2021. 2021. P. 012094.
11. Sevostyanova N.N., Trezorova O.Y., Danilovskikh M.G., Zhukova M.Y., Likhanova I.A. // Global J. Sci. Frontier Res.: D Agricult. Veterin. 2021. Vol. 21 (2). <https://novbiotech.ru/blog/docs/Laser%20Radiation%20as%20a%20Method%20of%20Stimulating%20Plant%20Growth.pdf>
12. Шкодина Е.П., Жукова С.Ю., Яковлева В.А. Влияние лазерного излучения на рост и урожайность кормовых культур // Вестн. Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17. № 4 (83). С. 14–24. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_4_14-24
13. Mohammad Nadimi, Da Wen Sun, JitendraPaliwal. Recent applications of novel laser techniques for enhancing agricultural production March 2021 // Laser Physics. 31(5). 053001. DOI: 10.1088/1555-6611/abebda.
14. Юран С.И., Зарипов М.Р., Вершинин М.Н. Влияние монохроматического излучения различного спектрального состава на растительные клетки // Вестн. НГИЭИ. 2021. № 7 (122). С. 16–25. DOI: 10.24412/2227-9407-2021-7-16-25/.
15. Калашник Н.А., Чиркова Т.В. Биостимулирующее действие низкоинтенсивного лазерного излучения на сельскохозяйственные растения // Вестн. Российской академии сельскохозяйственных наук. 2019. № 3. С. 45–48.
16. Coogler G. The effect of red and far red light on flowering. CANNA. 2017. URL: <https://www.canna-uk.com/effect-of-red-and-far-red-light-on-flowering> (дата обращения: 05.06.20).
17. Чижиков М.С., Залтан Е.И. Роль и значение лазерного излучения в эффективности овощеводства // Наука без границ. 2018. № 5 (22). С. 31–35. <https://nauka-bez-granic.ru/zhurnaly/n-5-22-maj-2018/rol-i-znachenie-lazernogo-izlucheniya-v-effektivnosti-ovoshhevoda.html>
18. Hernandez A.C., Dominguez P.A., Cruz O.A., Ivanov R., Carballo C.A., Zepeda B.R. Laser in agriculture // International Agrophysics. 2010. Vol. 24. No. 4. P. 407–422. <http://www.international-agrophysics.org/pdf-106402-37251?filename=Laser%20in%20agriculture.pdf>
19. Khamis G., Hassan M., Morsy M., Ibrahim M.A., Abd-Elsalam R.M., El Badawy S.A., Azouz A.A., Galal M. Innovative application of helium-neon laser: enhancing the germination of *Adansonia digitata* and evaluating the hepatoprotective activities in mice // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. No. 21. P. 26520–26531. DOI: 10.1007/s11356-020-09036-0. URL: <https://inis.iaea.org/records/snny0-jny04>
20. Беликов А.В., Федорова Ю.В. Биофотоника. Конспект лекций и лабораторный практикум. СПб.: Университет ИТМО, 2022. 104 с.
21. Уфимцева М.А., Бочкарев Ю.М., Вишневская И.Ф. [и др.]. Лазерные технологии в коррекции эстетических недостатков кожи: учеб. пособие / под ред. д-ра мед. наук, проф. М.А. Уфимцевой; Урал. гос. мед. ун-т, М-во здравоохранения РФ. Екатеринбург: УГМУ, 2021. 102 с.
22. Danhong Hana, Jingjing Xua, Zhenhai Wanga, Nana Yanga, Xunzhou Lib, Yingying Qianb, Ge Lib, Rujun Daib and Shengyong Xu. Penetrating effect of high-intensity infrared laser pulses through body tissue.

DOI: 10.1039/C8RA05285A (Paper) RSC Adv. 2018. Iss. 8. P. 32344–32357. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/ra/c8ra05285a>

23. Поединникова В.О., Марьяновская Ю.В. Влияние лазерного излучения на рост семян редиса (*raphanus sativus*) и горчицы (*brassica juncea*). Текст: непосредственный // Молодой ученый. 2017. № 20 (154). С. 172–174. URL: <https://moluch.ru/archive/154/43639/> (дата обращения: 05.05.2025).
24. Дворовенко Н.И. Лазерная стимуляция семян овощных культур // Вестник КСХИ. Кемерово, 1995. С. 34–36.
25. Дударева Л.В. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на процессы роста и развития в растительной ткани. Иркутск, 2004. С. 9.
26. Петухов В.Г., Матвеева Л.А. Влияние гелий-неонового лазера на рост и продуктивность картофеля // Картофель и овощи. 2018. № 5. С. 28–30.
27. Сидоров А.В. и др. Оптимизация параметров лазерного облучения семенного картофеля // Докл. РАСХН. 2021. № 4. С. 112–115.
28. Кузнецова Т.И. Эффективность предпосевной обработки клубней картофеля лазерным излучением // Аграрный вестн. Урала. 2017. № 5 (159). С. 24–28.
29. Askari N., Ghahremani R., Raisi A. et al. Far-Red Radiation Enhances in vitro Potato Plantlet Growth by Stimulating Dry Weight Accumulation. PotatoRes. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09809-x>
30. Toyoki Kozai, Kazuhiro Fujiwara Erik S. Runkle / LED Lighting for Urban Agriculture. URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0007/8006/85/L-G-0007800685-0016841879.pdf>
31. Чурюкин Р.С. Закономерности формирования биологических эффектов при облучении семян ячменя / дис. ... канд. биол. наук. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИИРАЭ). 2017.
32. Hideg É. et al. UV-B exposure, ROS, and stress: Inseparable companions or loosely linked associates? // Trends in Plant Science. 2013. Vol. 18 (2). P. 107–115. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.09.003. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23084465/>
33. Schreiner M. et al. UV-B-induced secondary plant metabolites: Potential benefits for plant and human health // Critical Reviews in Plant Sciences. 2016. Vol. 35 (4). P. 229–240. DOI: 10.1080/07352689.2016.1259185. URL: https://www.researchgate.net/publication/254218759_UV-B-Induced_Secondary_Plant_Metabolites_-Potential_Benefits_for_Plant_and_Human_Health
34. Зайцева Е.Н. и др. УФ-обработка как метод повышения устойчивости картофеля к патогенам // Защита и карантин растений. 2019. № 8. С. 35–38.
35. Горбунова А.О. Влияние ультрафиолетового излучения на биохимический состав клубней картофеля // Сибирский вестн. сельскохозяйственной науки. 2020. № 3. С. 41–47.
36. Кулешова Т.Э., Удалова О.Р., Балашова И.Т., Аникина Л.М., Конончук П.Ю., Мирская Г.В., Дубовицкая В.И., Вертебный В.Е., Хомяков Ю.В., Панова Г.Г. Особенности влияния спектра излучения на продуктивность и биохимический состав тестовых плодовых и листовых овощных культур. Журнал технической физики. 2022. Т. 92. Вып. 7. С. 1060–1068.
37. Тихонов А.В., Тихонов В.Н., Иванов И.А., Еникеева Т.Ф. Действие гамма-, УФ- и СВЧ-облучения на клубни картофеля // Современная техника и технологии. 2016. № 11. Ч. 1. URL: <https://technology.sciauka.ru/2016/11/11072> (дата обращения: 29.04.2025).
38. Зейналов А.А., Ипатова А.Г., Летова А.Н., Глухов А.П. Использование ультрафиолетового излучения для обработки клубней картофеля // Докл. Российской академии сельскохозяйственных наук. 2005. № 2.

REFERENCES

1. Kul'chin Yu.N., Gafitskaya I.V., Nakonechnaya O.V., Kozhanov S.O., Kholin A.S., Subbotin E.P., Subbotina N.I. Vliyanie spektral'nogo sostava i intensivnosti sveta na razvitiye mikrorastenii *Solanum Tuberosum* L. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*. 2025;1(239):19–30. (In Russ.).
2. Kul'chin Yu.N., Subbotin E.P., Kozhanov S.O., Kholin A.S., Subbotina N.I. Ehffekt izmereniya sostoyaniya polyarizatsii lazernogo izlucheniya, prokhodyashchego cherez list'ya rastenii. *Opticheskie metody issledovaniya potokov. Trudy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*. Moscow; 2023:562–572. (In Russ.).

3. Kul'chin Yu.N., Subbotin E.P., Kholin A.S., Kozhanov S.O., Demidchik V.V., Trofimov Yu.V., Kovalevskii K.V., Subbotina N.I., Gomol'skii A.S. Vliyanie ehpidermisa list'ev rastenii na ehffektivnost' ikh vzaimodeistviya s nizkointensivnym lazernym izlucheniem. *Kvantovaya ehlektronika*. 2023;53(1):79–87. (In Russ.).
4. Hernandez A.C., Dominguez P.A., Cruz O.A., Ivanov R., Carballo C.A., Zepeda B.R. *Int. Agrophys.* 2010;24:407.
5. Budagovskii A.V., Solovykh N.V., Budagovskaya O.N., Budagovskii I.A. Reaktsiya rastitel'nykh organizmov na vozdeistvie kvazimonokhromaticheskogo sveta s razlichnoi dlitel'nost'yu, intensivnost'yu i dlinoi volny. *Kvantovaya ehlektronika*. 2015;45 (4):345–350. (In Russ.).
6. Nakonechnaya O.V., Subbotin E.P., Grishchenko O.V., Gafitskaya I.V., Orlovskaya I. Yu., Kholin A.S., Goltsova D.O., Subbotina N.I., Bulgakov V.P., Kulchin Yu.N. In vitro potato plantlet development under different polychromatic LED spectra and dynamic illumination. *Botanica Pacifica. Journal of Plant Science and Conservation*. 2021;10(1):69–74.
7. Yugai Yu.A., Grishchenko O.V., Vasyutkina E.A., Grigorchuk V.P., Chukhlomina E.N., Tsydeneshieva Zh.L., Kudinova O.D., Yaroshenko Yu.L., Degtyarenko A.I., Subbotin E.P., Bulgakov V.P., Kul'chin Yu.N., Shkryl' Yu.N. Vliyanie regul'yatorov rosta i razlichnykh spektrov monokhromaticheskogo izlucheniya na rostovye i biosinteticheskie kharakteristiki kallusnoi kul'tury Ipomoeabatatas (L.)Lam. *Fiziologiya rastenii*. 2023;70(7):811–822.7. (In Russ.).
8. Hasan M., Hanafiah M.M., Taha Z.A., AlHilfy I.H., Said M.N.M. *Appl. Sci.* 2020;10:1189. DOI: 10.3390/app10031189.
9. Filina V.S., Sevost'yanova N.N., Danilovskikh M.G. Primenenie lazernogo izlucheniya dlya stimulyatsii rosta rastenii. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2020;20(5):767–769. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-5-767-769 (In Russ.).
10. Sevostyanova N.N., Tiranova L.V., Avdeev E.A. Study of Laser Radiation Effect on Quality of Forage Potatoes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «Innovative Technologies in Agroindustrial, Forestry and Chemical Complexes and Environmental Management, ITAFCCEM 2021»*. 2021;012094.
11. Sevostyanova N.N., Trezorova O.Y., Danilovskikh M.G., Zhukova M.Y., Likhanova I.A. *Global J. Sci. Frontier Res.: D Agricult. Veterin.* 2021;21(2). <https://novbiotech.ru/blog/docs/Laser%20Radiation%20as%20a%20Method%20of%20Stimulating%20Plant%20Growth.pdf>
12. Shkodina E.P., Zhukova S. Yu., Yakovleva V.A. Vliyanie lazernogo izlucheniya na rost i urozhainost' kormovyykh kul'tur. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2024;17(4):14–24. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_4_14-24 (In Russ.).
13. Mohammad Nadimi, Da Wen Sun, Jitendra Paliwal. Recent applications of novel laser techniques for enhancing agricultural production March 2021. *Laser Physics*. 31(5):053001. DOI: 10.1088/1555-6611/abebda.
14. Yuran S.I., Zaripov M.R., Vershinin M.N. Vliyanie monokhromaticheskogo izlucheniya razlichnogo spektral'nogo sostava na rastitel'nye kletki. *Vestnik NGIEHI*. 2021;7(122):16–25. DOI: 10.24412/2227-9407-2021-7-16-25 (In Russ.).
15. Kalashnik N.A., Chirkova T.V. Biostimuliruyushchee deistvie nizkointensivnogo lazernogo izlucheniya na sel'skokhozyaistvennye rasteniya. *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2019;3:45–48 (In Russ.).
16. Coogler G. The effect of red and far red light on flowering. CANNA. 2017. URL: <https://www.canna-uk.com/effect-of-red-and-far-red-light-on-flowering> (date of application: June 5, 2020).
17. Chizhikov M.S., Zaltan E.I. Rol' i znachenie lazernogo izlucheniya v ehffektivnosti ovoshchovedstva. *Nauka bez granits*. 2018;5(22):31–35. URL: <https://nauka-bez-granic.ru/zhurnaly/n-5-22-maj-2018/rol-i-znachenie-lazernogo-izlucheniya-v-effektivnosti-ovoshhevoda.html> (In Russ.).
18. Hernandez A.C., Dominguez P.A., Cruz O.A., Ivanov R., Carballo C.A., Zepeda B.R. Laser in agriculture. *International Agrophysics*. 2010;24(4):407–422. URL: <http://www.international-agrophysics.org/pdf-106402-37251?filename=Laser%20in%20agriculture.pdf>
19. Khamis G., Hassan M., Morsy M., Ibrahim M.A., Abd-Elsalam R.M., El Badawy S.A., Azouz A.A., Galal M. Innovative application of helium-neon laser: enhancing the germination of *Adansonia digitata* and evaluating the hepatoprotective activities in mice. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27(21):26520–26531. DOI: 10.1007/s11356-020-09036-0. URL: <https://inis.iaea.org/records/snny0-jny04>
20. Belikov A.V., Fedorova Yu.V., Biofotonika. Konspekt lektsii i laboratornyi praktikum. St. Petersburg: Universitet ITMO; 2022. 104 p. (In Russ.).

21. Ufimtseva M.A., Bochkarev Yu.M., Vishnevskaya I.F. [i dr.]. Pod red. d-ra med. nauk, prof. M.A. Ufimtsevoi. Lazernye tekhnologii v korrektsii ehsteticheskikh nedostatkov kozhi: ucheb. posobie. Ural. gos. med. un-t, M-vo zdravookhraneniya RF. Ekaterinburg: UGMU; 2021. 102 p. (In Russ.).
22. Danhong Hana, Jingjing Xua, Zhenhai Wanga, Nana Yanga, Xunzhou Lib, Yingying Qianb, Ge Lib, Rujun Daib and Shengyong Xu. Penetrating effect of high-intensity infrared laser pulses through body tissue. DOI: 10.1039/C8RA05285A (Paper) RSC Adv. 2018;8:32344–32357. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2018/ra/c8ra05285a>
23. Poedinshchikova V.O. Vliyanie lazernogo izlucheniya na rost semyan redisa (raphanussativus) i gorchitsy (brassicajuncea). Ed. by V.O. Poedinshchikova, Yu.V. Mar'yanovskaya. Tekst: neposredstvennyi. *Molodoi uchenyi*. 2017;20(154):172–174. URL: <https://moluch.ru/archive/154/43639/> (date of application: May 5, 2025) (In Russ.).
24. Dvorovenko N.I. Lazernaya stimulyatsiya semyan ovoshchnykh kul'tur. *Vestnik KSKHI*. Kemerovo; 1995:34–36 (In Russ.).
25. Dudareva L.V. Vliyanie nizkointensivnogo lazernogo izlucheniya na protsessy rosta i razvitiya v rastitel'noi tkani. Irkutsk; 2004. 9 p. (In Russ.).
26. Petukhov V.G., Matveeva L.A. Vliyanie gelii-neonovogo lazera na rost i produktivnost' kartofelya. *Kartofel'i ovoshchi*. 2018;5:28–30 (In Russ.).
27. Sidorov A.V. et al. Optimizatsiya parametrov lazernogo oblucheniya semennogo kartofelya. *Doklady RASKHN*. 2021;4:112–115. (In Russ.).
28. Kuznetsova T.I. Ehffektivnost' predposevnoi obrabotki klubnei kartofelya lazernym izlucheniem. *Agrarnyi vestnik Urala*. 2017;5(159):24–28 (In Russ.).
29. Askari N., Ghahremani R., Raisi A. et al. Far-Red Radiation Enhances in vitro Potato Plantlet Growth by Stimulating Dry Weight Accumulation. *PotatoRes*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11540-024-09809-x>
30. Toyoki Kozai, Kazuhiro Fujiwara Erik S. Runkle / LED Lighting for Urban Agriculture. URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0007/8006/85/L-G-0007800685-0016841879.pdf>
31. Churyukin R.S. Zakonomernosti formirovaniya biologicheskikh ehffektov pri obluchenii semyan yachmenya: Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata biologicheskikh nauk, Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe nauchnoe uchrezhdenie «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut radiologii i agroehkologii» (FGBNU VNIIRAEH). 2017 (In Russ.).
32. Hideg É. et al. UV-B exposure, ROS, and stress: Inseparable companions or loosely linked associates? *Trends in Plant Science*. 2013;18(2):107–115. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.09.003. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23084465/>
33. Schreiner M. et al. UV-B-induced secondary plant metabolites: Potential benefits for plant and human health. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2016;35(4):229–240. DOI: 10.1080/07352689.2016.1259185. URL: https://www.researchgate.net/publication/254218759_UV-B-Induced_Secondary_Plant_Metabolites_-Potential_Benefits_for_Plant_and_Human_Health
34. Zaitseva E.N. et al. UF-obrabotka kak metod povysheniya ustoichivosti kartofelya k patogenam. *Zashchita i karantin rastenii*. 2019;8:35–38 (In Russ.).
35. Gorbunova A.O. Vliyanie ul'trafioletovogo izlucheniya na biokhimicheskii sostav klubnei kartofelya. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki*. 2020;3:41–47 (In Russ.).
36. Kuleshova T. Eh., Udalova O.R., Balashova I.T., Anikina L.M., Kononchuk P. Yu., Mirskaya G.V., Dubovitskaya V.I., Vertebnyi V.E., Khomyakov Yu.V., Panova G.G. Osobennosti vliyaniya spektra izlucheniya na produktivnost' i biokhimicheskii sostav testovykh plodovykh i listovykh ovoshchnykh kul'tur. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2022;92(7):1060–1068 (In Russ.).
37. Tikhonov A.V., Tikhonov V.N., Ivanov I.A., Enikeeva T.F. Deistvie gamma-, UF- i SVCH-oblucheniya na klubni kartofelya. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2016;11(1). URL: <https://technology.sciaksa.ru/2016/11/11072> (date of application: April 29, 2025) (In Russ.).
38. Zeinalov A.A., Ipatova A.G., Letova A.N., Glukhov A.P. Ispol'zovanie ul'trafioletovogo izlucheniya dlya obrabotki klubnei kartofelya. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2005;2 (In Russ.).