Journal of Chemistry of Goods and Traditional Medicine

J Chem Good Trad Med, Volume 5, Issue 1, 2026 Chemistry of Goods

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН ХЛОПЧАТНИКА: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ

Ибрагим Рахманович Аскаров
Андижанский государственный университет, Профессор кафедры химии, доктор химических наук, заслуженный изобретатель Республики Узбекистан, председатель Академии ТАБОБАТ Республики Узбекистан
https://orcid.org/0000-0003-1625-0330

Шухрат Кушакбоевич Абдурахмонов
Андижанский государственный университет, независимый исследователь
https://orcid.org/0009-0005-6183-4265

Обиджон Шахабидинович Абдуллоев
Андижанский государственный университет, Заведующий кафедрой "Химия природных соединений и пищевых продуктов", доцент, доктор химических наук (DSc), член Академии Табобат Узбекистана
https://orcid.org/0000-0003-2289-1273

DOI: https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss1.2026.608

Ключевые слова:
семена хлопчатника, лазерное облучение, оптическая предпосевная активация, фотобиомодуляция, плотность энергии

Аннотация

В данном литературном обзоре последовательно анализируются научные исследования, посвящённые предпосевной обработке семян хлопчатника лазерным излучением (оптической предактивации). В хлопководстве равномерные и быстрые всходы (однородное заполнение поля), раннее развитие и конечная урожайность во многом зависят от физиологического состояния семян, условий их хранения, а также стрессовых факторов в период посева. Лазерное облучение рассматривается как физический метод, образующий меньше отходов по сравнению с химической обработкой семян и легко поддающийся автоматизации.В обзоре обобщены основные работы по оптической обработке семян хлопчатника (диодные лазеры синего спектра, различные светодиоды, обработки в ультрафиолетовом диапазоне), а также соответствующие механистические объяснения (активация фоторецепторов, баланс реактивных форм кислорода, проницаемость мембран и мобилизация запасных веществ). На основе спектроскопических данных показан нелинейный характер «hormezis» как тип ответа на дозу лазерного воздействия: стимулирующий эффект при низких дозах и ингибирующее действие при избыточных дозах рассматриваются как ключевая проблема.Кроме того, критически оцениваются сильные и слабые стороны имеющихся данных — экспериментальный дизайн, воспроизводимость, различия партий семян (лотов), внешняя валидность в полевых условиях, стандартизация параметров и инженерные ограничения при масштабировании технологии до промышленного уровня. В заключение предлагаются конкретные направления дальнейших исследований, включая минимальные стандарты отчётности, оптимизацию зависимости «доза–эффект» и проведение многофакторных полевых испытаний в различных агроэкологических зонах.

Как цитировать

Аскаров, И. Р., Абдурахмонов, Ш. К., & Абдуллоев, О. Ш. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН ХЛОПЧАТНИКА: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ. Журнал химии товаров и народной медицины, 5(1). https://doi.org/10.55475/jcgtm/vol5.iss1.2026.608

1. Введение

Хлопчатник (*Gossypium hirsutum* L.) в системе сельскохозяйственного производства характеризуется тем, что качество семян и начальное развитие всходов являются одними из ключевых факторов формирования урожая. На практике механические повреждения семян (в процессе джинирования и делинтирования), перекисное окисление липидов при хранении, а также нарушения режима влажности и температуры приводят к снижению энергии прорастания семян и вызывают запаздывающее и неравномерное прорастание в полевых условиях.В результате нарушается равномерность заполнения поля, усиливается внутривидовая конкуренция растений в рядках, возрастает давление сорных растений и снижается стабильность урожайности. Проблемы качества семян особенно обостряются в условиях жарких и влажных сезонов, засоления почв, а также при ранних сроках посева, сопряжённых с высоким риском повреждения холодом (Mylsamy et al., 2025).

Предпосевная обработка семян широко применяется на практике и включает такие подходы, как химическая обработка, инкрустация семян, гидропредпосевная обработка (увлажнение с активацией), осмотическая предпосевная обработка и биологическая предпосевная обработка. Однако при использовании химических средств остаются актуальными проблемы экологического следа, безопасности операторов, формирования резистентности и наличия остаточных веществ (резидуев). В этом контексте методы, относящиеся к «физической активации семян», в частности применение электромагнитных полей, ультразвука, плазмы и светового воздействия, рассматриваются как перспективное направление (Araújo et al., 2016). Физические методы, как правило, быстры, не требуют реагентов и могут быть интегрированы в производственные линии.

Лазерное облучение (обработка семян с использованием низкоинтенсивного лазера) является одной из наиболее обсуждаемых и приближённых к практике форм оптической предпосевной активации. Основное преимущество лазера заключается в возможности точного контроля дозы и спектра, то есть длины волны, плотности мощности (иррадиации), плотности энергии (флюенса) и времени экспозиции с высокой воспроизводимостью. Вместе с тем универсального протокола лазерной обработки не существует: степень делинтации семян, толщина семенной кожуры, наличие пигментов, влажность и возраст хранения, а также микрофлора семян могут существенно влиять на оптический ответ. Поэтому лазерная обработка часто демонстрирует нелинейный гормезисный тип ответа на дозу воздействия: при низких дозах наблюдается стимулирующий эффект, тогда как при избыточных дозах — ингибирующее действие (Araújo et al., 2016).

Целью данного литературного обзора является последовательный и критический анализ существующих научных исследований по предпосевной обработке семян хлопчатника лазером (а в более широком смысле — оптическими методами). В обзоре рассматриваются: (i) основные эмпирические результаты по семенам хлопчатника; (ii) технические параметры, определяющие дозу лазерного воздействия, и стандарты их представления; (iii) возможные механизмы (фоторецепторы, баланс реактивных форм кислорода, мембранные процессы и метаболизм); (iv) методологические ограничения и проблемы воспроизводимости; (v) требования к индустриализации и внедрению; а также (vi) конкретные исследовательские пробелы и практическая повестка для будущих работ.

Ввиду ограниченного количества исследований по лазерному облучению семян хлопчатника, в данном обзоре источники отбирались на двух уровнях. Первый уровень включает прямые исследования, посвящённые оптической обработке семян хлопчатника с получением лабораторных и полевых результатов (например, работы по оптической активации с широким экспериментальным охватом, а также исследования, основанные на спектроскопическом анализе лазерного воздействия). Второй уровень охватывает обзорные и методологические статьи, рассматривающие технологии физической предпосевной обработки в целом, а также данные по другим культурам, освещающие общие механизмы лазерной стимуляции. Такой подход позволяет частично компенсировать проблему ограниченности данных по хлопчатнику, однако требует

осторожности при формулировании выводов, поскольку структура семян и их биохимические особенности могут существенно различаться у разных культур.

Каждая эмпирическая работа оценивалась по следующим блокам:

(1) характеристика семенного материала — сорт, тип делинтирования, влажность (%), срок хранения и исходные показатели всхожести;

(2) параметры оптического устройства — длина волны, мощность, площадь светового пятна, иррадианс (Вт/см²), флюенс (Дж/см²), время экспозиции, импульсный/непрерывный режим, геометрия облучения;

(3) экспериментальный дизайн — контрольные группы, рандомизация, число повторностей, связь лабораторных и полевых исследований;

(4) показатели результатов — процент и скорость прорастания, индекс энергии биометрические параметры проростков, стресс-тесты, полевая урожайность;

(5) статистическая обработка и обоснованность выводов.

2. Научные основы технологии лазерной и оптической обработки

Физической основой взаимодействия семян и лазерного излучения являются процессы поглощения, рассеяния и передачи энергии (преимущественно химическим связям или пигментам). У семян хлопчатника оболочка толстая, поверхность неровная, возможны остатки делинта, что усиливает отражение и рассеяние света и уменьшает поток фотонов, достигающих зародыша. Поэтому при выборе длины волны необходимо учитывать спектры поглощения семенной оболочки и внутренних тканей, а также диапазоны чувствительности фоторецепторов. Ожидается, что синий диапазон (примерно 400–470 нм) преимущественно активирует системы криптохромов и фототропинов, тогда как красный диапазон (примерно 630–660 нм) — систему фитохромов.

Цель обработки низкомощным лазером — создание фотобиологического сигнала без значительного нагревания семени. Однако понятие «низкая мощность» является относительным: при очень малом размере светового пятна или близком расстоянии до семени иррадианс может существенно возрасти. Поэтому при отсутствии контроля теплового эффекта механизм воздействия может смещаться от фотобиомодуляции к термическому стрессу. Кроме того, эффект оптической обработки часто носит нелинейный характер и характеризуется наличием «окна оптимальной дозы»: доза ниже оптимальной может не вызывать заметных изменений, тогда как превышение оптимума способно снижать всхожесть за счёт окислительного стресса и повреждения мембран. Это явление объясняется концепцией гормезиса и широко обсуждается в литературе по физическим методам обработки (Araújo et al., 2016).

С технологической точки зрения первой проблемой является равномерность дозы (однородность облучения). При движении семян в потоке они частично затеняют друг друга: одни подвергаются прямому воздействию излучения, другие — лишь диффузно рассеянному свету. В лабораторных условиях семена, как правило, размещаются тонким слоем и удерживаются на одинаковом расстоянии от источника излучения; в промышленных же условиях для обеспечения равномерного распределения дозы требуются вращение семян, вибрационные питатели, многоточечные источники света или оптические диффузоры. В противном случае в одной партии смешиваются семена, получившие «недостаточную» и «избыточную» дозу, что увеличивает дисперсию результатов и снижает статистическую достоверность.

Вторая проблема — исходное состояние семян. Влажность хлопковых семян (например, 7% или 12%), срок хранения, тип делинтирования (механическое, кислотное или газовое), степень повреждённости оболочки и уровень микрофлоры могут существенно влиять на отклик на оптическую обработку (Mylsamy et al., 2025). Например, кислотное делинтирование может очищать поверхность семени и облегчать проникновение излучения, однако при неправильном проведении оно способно ослабить оболочку и повысить чувствительность к оптическому стрессу. Следовательно, лазерная обработка не является «универсальным рецептом», а должна

рассматриваться как технология, адаптируемая к конкретной партии семян, с чётко заданными параметрами и строгим контролем качества.

Третьим ключевым вопросом являются критерии оценки эффективности. Воздействие лазерной обработки зачастую проявляется не в увеличении общего процента всхожести, а в ускорении прорастания, повышении жизнеспособности (vigor), увеличении длины корневой системы проростков и лучшей устойчивости в стрессовых условиях. В связи с этим использование только итогового показателя всхожести может привести к недооценке эффекта обработки.При построении научного эксперимента целесообразно применять комплексный подход, включающий анализ динамики прорастания (например, в промежутке 24–72 часов), оценку биометрических параметров проростков, а также полевые показатели, такие как равномерность и полнота всходов.

3. Эмпирические данные по лазерной и оптической активации семян хлопчатника

Исследования по оптической активации семян хлопчатника пока немногочисленны, однако ряд работ включает не только лабораторные показатели, но и полевые результаты. Так, Atta et al. (2023) сравнили несколько вариантов предпосевной оптической обработки (светодиоды синего и красного спектра, диодный лазер, а также обработки ультрафиолетом-B и ультрафиолетом-C), оценив лабораторные показатели всхожести и энергии прорастания, а затем представили результаты полевых испытаний в различных условиях. Авторы показали, что отдельные протоколы способны существенно повышать показатели прорастания и оказывать положительное влияние на урожайность. Сильной стороной данной работы является попытка верификации лабораторных данных в полевых условиях, поскольку именно в поле проявляется практическая агрономическая и экономическая значимость оптической обработки.

В то же время в работе Atta et al. (2023) из-за большого числа модифицируемых параметров затрудняется выделение чёткой причинно-следственной связи. Когда в рамках одного экспериментального дизайна используются различные спектры, диапазоны экспозиции и условия среды, становится сложно определить, какой именно фактор играет решающую роль. Кроме того, в описании протоколов оптической обработки не всегда с одинаковой точностью представлены и стандартизированы такие параметры, как флюенс и иррадианс. Это ограничивает возможности воспроизводимости (репликации) результатов в других лабораториях. Проблема воспроизводимости особенно актуальна для лазерной обработки, поскольку даже небольшие геометрические различия (расстояние до источника, размер светового пятна, толщина слоя семян) могут существенно изменить распределение дозы.

В качестве работы, более близко рассматривающей молекулярное действие лазера на семена хлопчатника, можно отметить исследование Ahmed и Marouf (2025), в котором применялся синий диодный лазер (405 нм). С использованием ультрафиолетово-видимой спектроскопии и инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье авторы анализировали изменения в спектрах поглощения и вибрационных линиях компонентов семян. Показано, что в диапазоне низких значений флюенса (примерно 0,167–0,667 Дж/см²) существует «окно оптимальной дозы», тогда как при увеличении дозы может наблюдаться торможение прорастания. Научная значимость данной работы заключается в попытке напрямую связать биологический результат (всхожесть) с физико-химическими сигналами (спектральными изменениями). Однако с методологической точки зрения для установления «моста» между спектроскопическими сигналами и биологическими механизмами необходимы дополнительные биомаркеры (например, маркеры окислительного стресса, активность ферментов, водопоглощение); в противном случае трудно однозначно доказать биологическую природу наблюдаемых спектральных различий.

В исследованиях оптической активации семян хлопчатника с использованием не лазерного излучения, а ультрафиолетового света, Jawdat et al. (2020) показали, что обработка комбинацией ультрафиолета A, B и C повышает всхожесть длительно хранившихся семян, а также улучшает рост проростков в условиях солевого (хлорид натрия) и осмотического (полиэтиленгликоль) стресса. Авторы также продемонстрировали временную активацию экспрессии некоторых генов, связанных

со стресс-ответом. Эти результаты указывают на то, что оптическая обработка может действовать не только как источник энергии, но и как фактор, инициирующий механизмы адаптации к стрессу через сигнальные пути. Вместе с тем, учитывая более высокий риск фотохимического повреждения при ультрафиолетовом воздействии по сравнению с лазерным облучением, объединение этих подходов в одну категорию требует осторожности.

Из-за ограниченного числа исследований по хлопчатнику важный контекст для понимания общих биологических закономерностей лазерного облучения дают данные по другим сельскохозяйственным культурам. Так, Perveen et al. (2021), поэтапно увеличивая дозу гелий–неонового лазера (632,8 нм) при обработке семян сафлора, показали наличие оптимальной дозы, при которой наблюдаются наилучшие показатели прорастания и изменения метаболитов; авторы связывают этот эффект с активацией ферментов, участвующих в мобилизации запасных веществ.

Klimek-Kopyra et al. (2022) в полевых условиях продемонстрировали, что предпосевная лазерная стимуляция семян сои может влиять как на урожайность, так и на состав семян, включая белковую и жировую фракции. Хотя эти результаты не могут быть напрямую экстраполированы на хлопчатник, они служат важным подтверждением существования «окна оптимальной дозы» лазерного воздействия и его потенциального выхода на агрономически значимые эффекты.

4. Механизмы: фотобиологические и биохимические объяснения

Для объяснения влияния лазерного облучения на прорастание семян рассматриваются две основные, взаимодополняющие концепции:

(1) передача сигналов через фоторецепторы;

(2) адаптация через низкоинтенсивный стресс (hormezis). В рамках первой концепции предполагается, что излучение синего спектра активирует системы криптохромов и фототропинов, тогда как красный спектр воздействует на фитохромную систему. Активация фоторецепторов приводит к запуску сигнальных каскадов, в результате чего модулируются такие процессы, как гормональный баланс (соотношение гиббереллинов и абсцизовой кислоты), размягчение клеточной стенки, взаимодействие эндосперма и зародыша, а также экспрессия генов. В физиологии семян это можно рассматривать как «предварительную сигнализацию», способствующую более быстрому запуску метаболических путей, необходимых для начала прорастания.

Вторая концепция — *hormezis* — предполагает, что низкие дозы лазерного воздействия могут умеренно повышать уровень активных форм кислорода, переводя антиоксидантную систему в «подготовленное» состояние. Хотя активные формы кислорода традиционно рассматриваются как повреждающий фактор, при низких концентрациях они выполняют функцию сигнальных молекул. При активации антиоксидантных ферментов после оптической обработки проростки могут проявлять повышенную устойчивость к стрессам, таким как холод, засоление или дефицит влаги. Результаты Jawdat et al. (2020), показавшие временную активацию генов стресс-ответа у хлопчатника, согласуются с данной концепцией, однако для лазерной обработки семян хлопчатника полный профиль антиоксидантной системы и маркеры окислительного стресса пока изучены недостаточно. Спектроскопические данные могут служить вспомогательным инструментом для интерпретации механизмов. Ahmed и Marouf (2025) показали, что после лазерной обработки в спектрах UV-Vis и FTIR наблюдаются сдвиги отдельных полос и изменения их интенсивности; авторы объясняют это молекулярными возбуждениями и перераспределением энергии в области химических связей. Однако для того чтобы спектроскопические изменения можно было интерпретировать в биологическом контексте, необходимо выстроить причинно-следственную связь с такими показателями, как окисление мембранных липидов, конформационные изменения белков, состояние гидратации или активность ферментов. В противном случае, несмотря на информативность спектральных сигналов, ответ на вопрос «каким образом» остаётся неполным.

Анализ литературы выявляет ряд существенных пробелов в исследованиях лазерного облучения семян хлопчатника. Ниже представлены эти пробелы и практические предложения, направленные на их устранение.

1) Отсутствует минимальный стандарт отчётности параметров. В каждом исследовании необходимо в унифицированном формате указывать как минимум: длину волны; мощность; площадь светового пятна; расстояние «источник–семя»; иррадианс; флюенс; время экспозиции; импульсный или непрерывный режим; геометрию облучения; толщину слоя семян; тип делинтирования, влажность и срок хранения семян; а также исходные показатели всхожести. При невыполнении этих требований воспроизводимость (репликация) и проведение метаанализа фактически становятся невозможными.

2) Недостаточность данных по зависимости «доза–эффект». Большинство исследований ограничивается 2–4 уровнями дозы, что недостаточно для выявления оптимума в рамках гормезиса. В дальнейшем следует использовать дизайн на основе методологии поверхности отклика (например, иррадианс × время × длина волны), с последующим статистическим моделированием оптимальных условий и представлением результатов с доверительными интервалами.

3) Ограниченная обобщаемость по партиям и сортам семян. Оптимальные параметры, полученные для одного сорта и одной партии, могут не воспроизводиться в других условиях. Поэтому необходимы подтверждающие эксперименты как минимум на 3–5 различных партиях (с разным сроком хранения и уровнем жизнеспособности), а также на 2–3 сортах. Кроме того, в экспериментальный дизайн следует включать такие факторы, как способ делинтирования и наличие защитного покрытия семян.

4) Полевые испытания недостаточно представлены в многоцентровом и многолетнем формате. Практическая ценность оптической обработки оценивается именно в полевых условиях, при различных климатических и агрофоновых характеристиках. Хотя работа Atta et al. (2023) задала определённое направление, подтверждение результатов в виде многолетних и многоцентровых испытаний с использованием стандартизированных агротехнических протоколов остаётся ограниченным.

5) Недостаток механистических биомаркеров и причинно-следственных связей. Необходимо систематически измерять такие показатели, как активность антиоксидантных ферментов, уровень перекисного окисления липидов, водопоглощение, газообмен, соотношение гормонов, кинетика мобилизации запасных веществ — в привязке к различным дозам лазерного воздействия. Это позволит разделить сигнальный и стрессовый эффекты лазера, а также биологически обосновать оптимальные режимы обработки.

6) Долговременные эффекты и стабильность при хранении практически не изучены. Остаётся открытым вопрос: сохраняется ли эффект лазерной обработки, если она проводится за несколько недель или месяцев до посева? Для холодной плазмы подобный длительный эффект у семян хлопчатника уже показан (de Groot et al., 2018), однако для лазерного воздействия этот аспект остаётся недостаточно исследованным и имеет ключевое значение для промышленного внедрения.

В качестве перспективной повестки предлагается поэтапный подход: на первом этапе в лабораторных условиях определяется оптимальный диапазон параметров (длина волны × флюенс × влажность семян); затем оцениваются ключевые биомаркеры (окислительный стресс, антиоксидантная система, водопоглощение, ферментативная активность); далее проводится валидация в многоцентровых полевых испытаниях; и, наконец, осуществляется калибровка пилотной технологической линии с последующей экономической оценкой.

5. Заключение (альтернативный вариант)

Совокупность имеющихся данных по лазерной оптической активации семян хлопчатника указывает на перспективность данного подхода, однако текущий уровень доказательной базы остаётся недостаточно консолидированным для выработки универсальных технологических рекомендаций. Исследования, включающие полевые испытания (например, Atta et al., 2023), демонстрируют потенциальную агрономическую значимость метода, тогда как спектрально-молекулярные работы (Ahmed & Marouf, 2025) углубляют понимание механизмов действия и

закономерностей «доза–эффект». В то же время различия в методологии, отсутствие стандартизации параметров и ограниченная воспроизводимость существенно затрудняют сопоставление и интеграцию результатов.

С прикладной точки зрения лазерная обработка представляет интерес как экологически безопасная и технологически гибкая альтернатива, пригодная для автоматизации. Однако её промышленное внедрение требует решения ряда ключевых задач, включая обеспечение однородности дозирования, разработку безопасных и интегрируемых технологических решений, а также экономическое обоснование эффективности.

С научной стороны приоритетными направлениями остаются уточнение фотобиологической чувствительности семян, выявление оптимальных доз в рамках концепции гормезиса, а также установление чётких причинно-следственных связей на основе биомаркеров. Критически важным этапом является подтверждение полученных эффектов в многофакторных, многоцентровых и многолетних полевых исследованиях. Лишь при комплексном решении указанных задач лазерная технология сможет занять устойчивое и обоснованное место в системе предпосевной обработки семян хлопчатника.

Список литературы

1. Ahmed, A., & Marouf, A. (2025). Photophysical mechanisms of low-level laser irradiation on cotton seeds: Spectroscopic insights into molecular excitations. Advanced Physical Research, 7(3), 189–202. https://doi.org/10.62476/apr.73189

2. Araújo, S. de S., Paparella, S., Dondi, D., Bentivoglio, A., Carbonera, D., & Balestrazzi, A. (2016). Physical methods for seed invigoration: Advantages and challenges in seed technology. Frontiers in Plant Science, 7, 646. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646

3. Atta, B. M., Saleem, M., Abro, S., Rizwan, M., Sarwar, G., & Farooq, A. (2023). Enhancement of germination and yield of cotton through optical seed priming: Lab. and diverse environment studies. PLOS ONE, 18(7), e0288255. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288255

4. de Groot, G. J. J. B., Hundt, A., Murphy, A. B., Bange, M. P., & Mai-Prochnow, A. (2018). Cold plasma treatment for cotton seed germination improvement. Scientific Reports, 8(1), 14372. https://doi.org/10.1038/s41598-018-32692-9

5. Jawdat, D., Abu Kassem, I., Saleh, A., Aljapawe, A., Ikhtiar, A., & Al-Safadi, B. (2020). Priming of long-term stored cotton seeds using combined UV-A, B and C radiation and its influence on germination. Journal of Stress Physiology & Biochemistry, 16(4), 82–94.

6. Klimek-Kopyra, A., Neugschwandtner, R. V., Ślizowska, A., Kot, D., Dobrowolski, J. W., Pilch, Z., & Dacewicz, E. (2022). Pre-sowing laser light stimulation increases yield and protein and crude fat contents in soybean. Agriculture, 12(10), 1510. https://doi.org/10.3390/agriculture12101510

7. Mylsamy, P., Tamilmani, E., Venugopal, R., Murugaiyan, S., & Ranganathan, U. (2025). Cotton seed management: Traditional and emerging treatment approaches for enhanced productivity. Journal of Cotton Research, 8, 7. https://doi.org/10.1186/s42397-024-00209-7

8. Perveen, R., Ali, Q., Ashraf, M., Al-Qurainy, F., Jamil, Y., & Raza, A. (2021). Quantitative determination of the effects of He–Ne laser irradiation on seed thermodynamics, germination attributes and metabolites of safflower (Carthamus tinctorius L.) in relation with the activities of potential germinating enzymes. Agronomy, 11(7), 1411. https://doi.org/10.3390/agronomy11071411