

УДК 574/577

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ФОТОКОНВЕРСИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ В ТЕПЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

ПАСХИН М.О.*младший научный сотрудник,**Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН**Москва, Россия*

Аннотация

Понимание общего влияния фотоконверсионных покрытий (ФКП) и их специфических свойств преобразования света на продуктивность сельскохозяйственных культур и их питательную ценность является важной задачей. Данный вопрос в той или иной степени рассматривается в ряде статей. Вновь разработанные ФКП могут обладать как превосходными фотоконвертирующими свойствами, так и высокой стабильностью в требуемых условиях, однако их реальное влияние на рост растений можно оценить только в ходе экспериментов в теплицах или аналогичных условиях. В связи с этим, в данном обзоре рассматриваются некоторые аспекты проведения экспериментов по выращиванию растений. Нами было проанализировано 28 статей взятых за 2020-2024, индексируемые в Scopus или Web of science. Сначала мы проанализировали выбор экспериментальных культур, использованный авторами. Затем мы систематизировали и классифицировали параметры оценки роста растений, применявшиеся авторами рассмотренных статей. Затем рассматриваются непосредственные результаты тепличных экспериментов.

Ключевые слова: Фотоконверсия, покрытия, люминофоры, свет, теплица, растения

**ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF PHOTOCONVERSION COVERS ON
THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF PLANT
IN GREENHOUSE CONDITIONS**

PASKHIN M.O.

Junior researcher

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

Abstract

Understanding the overall impact of photoconversion covers (PCC) and their specific light-conversion properties on agricultural crop productivity and nutritional value is an important objective. This topic has been addressed to varying degrees in a number of articles. While newly developed PCCs may possess both superior light-conversion capabilities and high stability under required conditions, their actual effect on plant growth can only be assessed through experiments in greenhouses or similar environments. Consequently, this review examines certain aspects of conducting plant growth experiments. We analyzed 28 articles from 2020 till 2024, indexed in Scopus or Web of science. We begin by analyzing the choice of experimental crops used by researchers. We then systematized and classified the plant growth evaluation parameters employed in the articles under review. Finally, the direct results of greenhouse experiments are discussed.

Key words: Photoconversion, covers, phosphors, light, greenhouse, plants

Растительные культуры для тепличных экспериментов с ФКП

Приблизительно 55% экспериментов в теплицах было проведено на плодовых овощных культурах, причем наиболее популярными были томат [25], перец [26] и огурец [14]. Эти растения являются типичными тепличными

культурами с высокими требованиями к освещению [14] и представляют собой основные культуры, выращиваемые в теплицах, со стабильно высоким спросом [5]. Баклажаны были упомянуты в трех работах и были выбраны для экспериментов, поскольку также являются важными сельскохозяйственными культурами [22]. Три зерновые культуры (злаки) — пшеница, ячмень и просо — были использованы в работе Багияна и соавторов [1]. Также по одной работе было уделено внимание тыкве [22], сое [24] и ягодным культурам (ежевика [4] и земляника [16]).

Овощные культуры были использованы в 35% рассмотренных работ. Наиболее распространены листовые овощи. Эти культуры также пользуются высоким спросом (имея экономическое значение и пищевую ценность [20]) и довольно чувствительны к условиям освещения в теплице, таким как спектральный состав, интенсивность и фотопериод [14]. Группа листовых овощей представлена салатом (включая зеленый [20], красный [10], итальянский [13]), китайской капустой [23], белокочанной капустой [11] и мангольдом [21]. Также в группу овощных культур входят травы (базилик [16]). Около 7% всех культур в настоящем исследовании были непродовольственными. В трех статьях оценивалось влияние ФКП на модельные цветковые растения-представители, а именно *Arabidopsis thaliana* [6], петунию [24] и *Digitalis mariana* [15]. Последняя была выбрана авторами, поскольку является источником биологически активных карденолидов, включая перспективный противовирусный глюкоэватромонозид (GEV) [15]. Содзи и соавторы выращивали непродовольственную культуру — японскую лиственницу [21], которая является важнейшей лесной породой в северной биосфере. Эти деревья также светолюбивы и могут расти довольно быстро по сравнению с другими хвойными. Три процента от культур, использованных для экспериментов, занимают водоросли, такие как *Nannochloropsis oceanica* и *Phaeodactylum tricornutum*, в работе Чжана и коллег [28]. Они были выбраны

для экспериментов, поскольку являются первичными потребителями атмосферного CO₂ и устойчивыми продуцентами.

Таким образом, выбор модельных экспериментальных культур в основном зависит от целевой реальной культуры, при этом предпочтение отдается продовольственным культурам. В некоторых случаях авторы комбинировали культуры из разных групп, включая сочетание продовольственных с непродовольственными (см., например, [21]), чтобы более детально оценить влияние ФКП на процесс фотосинтеза и рост растений.

Параметры оценки воздействия ФКП на растения

Количество параметров, использованных разными авторами в проанализированных публикациях для оценки эффективности ФКП в качестве регуляторов роста растений в тепличных экспериментах, варьировалось от 2 до 16 в зависимости от глубины анализа. Наиболее распространенным подходом было использование четырех параметров (семь исследований или 22%), далее следовали два параметра (пять исследований) и восемь параметров (четыре исследования). Около половины исследователей (47%) использовали от двух до четырех параметров, а в 84% работ применялось от двух до восьми параметров (Рисунок 5). Наиболее комплексные анализы были проведены Храмовым и др. [11] и Гао с соавторами [5] (по 15 параметров в каждом), а также Хебертом и коллегами [8], которые использовали 16 параметров. В свете этих данных возникает важный вопрос: какие параметры наиболее часто используются для оценки эффективности ФКП и почему им отдается предпочтение?

Все наиболее часто используемые параметры для оценки эффективности ФКП можно классифицировать тремя способами. Первый способ — это классификация параметров в зависимости от оцениваемого органа растения, такого как листья, корни, плоды, побеги или другие специфические структуры. Вторая классификация основана на том, на какую область жизнедеятельности

растения повлияло наличие ФКП, включая морфологию (структурные изменения), физиологию (функциональные процессы), урожайность (репродуктивный выход) и биохимический состав (уровень специфических химических соединений). Третья классификация параметров основана непосредственно на измеряемом признаке. Здесь параметры различаются по типу проводимых измерений, таких как размер (длина, площадь, объем), количество (число листьев, плодов и т.д.), масса (свежая или сухая биомасса) и другие количественные или качественные характеристики. На практике эти параметры часто взаимосвязаны. Например, размер листа служит одновременно и морфологическим признаком, и измеряемой количественной характеристикой. Исследователи, как правило, комбинируют параметры из разных категорий в рамках одного исследования, чтобы получить комплексную оценку эффектов ФКП.

Чтобы определить, какие параметры используются наиболее часто, мы проанализировали частоту их упоминания в рассмотренных исследованиях. Наиболее часто изучаемыми параметрами были морфология частей растения и физиология (исключая фотосинтез), о которых сообщалось в общей сложности 76 раз. Параметры, связанные с фотосинтезом, также были в центре внимания, появившись в 42 исследованиях. Третьей по распространенности категорией был анализ химического состава, отмеченный в 41 исследовании, в то время как показатели урожайности и биомассы заняли четвертое и пятое места по распространенности соответственно. Это распределение подчеркивает, что исследователи отдают приоритет структурным и функциональным ответам растений при оценке эффективности ФКП, одновременно учитывая биохимические изменения и продуктивность.

Среди частей растения наиболее часто изучаемыми объектами являются листья (27 упоминаний) и все растение в целом, в частности высота, вес,

ширина и т.д. (18 упоминаний). За ними следуют плоды (16 раз), стебель или побег (девять раз), корень (три раза) и цветки (три раза).

Второе место среди параметров, используемых для оценки эффективности ФКП в тепличных экспериментах, занимает группа параметров фотосинтеза. Мы сформировали эту группу из параметров фотосинтетического процесса (разные авторы могут называть их по-разному, например, фотосинтетическая активность [27], эффективность фотосинтеза [17], скорость фотосинтеза [26]), содержания хлорофилла (общее содержание хлорофилла [1], относительная концентрация хлорофилла в листьях [25], хлорофилл а и b по отдельности и т.д.) и некоторых других параметров, использованных авторами для характеристики изменений фотосинтеза вследствие применения ФКП (значение F_v/F_m [6], максимальный квантовый выход ФС2, кинетика фотоиндуцированных изменений [2] и т.д.).

Третья по популярности группа параметров, а именно содержание химических компонентов (исключая хлорофилл, который относится к группе параметров фотосинтеза), включает семь часто используемых групп метаболитов. Среди них сахара (определяемое авторами общее содержание сахаров, глюкоза, фруктоза, сахароза и др.), белки (общие или растворимые), витамин С (аскорбиновая кислота, восстановленный витамин С), кислоты (титруемые кислоты, свободные аминокислоты, гидроксикислоты), фенолы (общее содержание фенолов или полифенолов), антоцианы (или его индекс) и каротиноиды. Следует отметить, что два последних соединения являются фотосинтетическими пигментами и также могли бы быть включены в группу параметров фотосинтеза, но здесь мы учли их как химические параметры в связи с их редким использованием. Среди «других» химических компонентов, содержание которых измеряли исследователи и которые упоминались не более чем в одной статье каждый, мы обнаружили пролин [1], липиды [28], общее содержание флавоноидов [4], триацилглицерины [28], эндогенные гормоны

(определяли уровень в плодах) [5], эйкозапентаеновую кислоту [28], глюкоэватромонозид (GEV) [15], ауксины [27], нитраты [3] и карденолиды [15].

Четвертая по размеру группа была названа «Редко встречающиеся». Она содержит параметры, которые не могли быть отнесены к другим группам и которые использовались нечасто (1-3 упоминания). Сюда мы поместили такие параметры, как газообмен [18], устьичная проводимость [4] и транспирация [7]. Некоторые авторы также проводили анализ экспрессии генов [28] и изучали реакцию растений на стрессовые условия [7].

Пятая группа параметров, упомянутая авторами 17 раз, включает параметры урожайности. Здесь можно найти не только абсолютную урожайность, но и удельную урожайность, т.е. урожайность с одного растения, урожайность с единицы площади [13] и общую урожайность с делянки [28]. Кроме того, Хеберт с соавторами [8] использовали совокупную товарную продукцию и общее производство плодовой биомассы (товарная продукция плюс отходы) для оценки изменения урожайности в условиях применения ФКП.

Последняя группа — это группа параметров биомассы. Она включает такие параметры, как общая биомасса [28], общая биомасса тела [21], а также продуктивность и кинетические параметры, а именно производство биомассы [21], производство биомассы по сухому весу [15] и скорость накопления биомассы [18]. Биомасса ягод [9] и плодовая биомасса куста [22] также были отнесены к этой категории.

Эффект ФКП на рост растений

Для сравнения результатов влияния ФКП на рост растений наиболее часто используемые параметры (назовем их «базовыми параметрами») были сгруппированы и подсчитаны. В Таблице 1 представлены три основные группы базовых параметров. Группа «Урожайность и биомасса» содержит все

параметры, описывающие урожай, продуктивность, накопление биомассы и т.д. Группа «Фотосинтез и содержание хлорофилла» включает все параметры, характеризующие процесс фотосинтеза (скорость, интенсивность и пр.) и содержание хлорофилла (общее, хлорофилл а, хлорофилл b). Третья группа, «Размер растения и площадь листьев», состояла из параметров размера растения и его частей, а также площади листовой поверхности.

Таблица 1. Увеличение основных параметров для ФКП с различными люминофорами.

Параметры увеличивающиеся под ФКП	Тип флорофора		
	Редкоземельные	Нередкоземельные	Органические *
Урожайность и биомасса	69%	83%	75%
Фотосинтез и содержание хлорофилла	38%	67%	75%
Размер растений и площадь листьев	62%	75%	75%

* Было проанализировано всего 4 работы по ФКП с органическими флуорофорами

Было подсчитано количество статей, сообщающих об увеличении параметров из этих групп, и их проценты показаны в Таблице 1. Следует отметить, что не все авторы измеряли все параметры из этих трех групп. Следовательно, результаты расчета являются весьма приблизительными и предназначены лишь для формирования общего представления о заявленных экспериментальных результатах. Еще один важный момент: было проанализировано всего четыре статьи по ФКП на основе органических люминофоров. Поэтому расчетный процент для этой группы материалов не следует принимать во внимание.

Таким образом, при сравнении результатов для ФКП с редкоземельными люминофорами и ФКП с редкоземельными люминофорами видно, что последние чаще приводили к увеличению выбранных базовых параметров. Так,

в большинстве работ эти ФКП способствуют росту урожайности и продуктивности, фотосинтетической активности растений, а также характеристикам их размеров. Данная тенденция может быть связана со спецификой излучения группы редкоземельных люминофоров для ФКП. Сравнивая ФКП на основе редкоземельных и редкоземельных элементов, можно заметить, что последние излучают больше в красной, чем в дальней красной области. Также они реже возбуждаются УФ-светом по сравнению с редкоземельными люминофорами. Около 45% от заявленных редкоземельных неорганических люминофоров в ФКП имеют максимумы возбуждения в видимой области. Эти факторы могли привести к более высоким значениям базовых параметров растений, выращенных под ФКП с редкоземельными люминофорами, по сравнению с теми, где использовались редкоземельные фотонные конвертеры.

Некоторые выбранные работы рассматриваются ниже.

Ли и соавторы [13] предложили и изучили ФКП на основе редкоземельных элементов, которая улучшала ряд параметров в теплице, включая ФАР, в условиях частой облачности. Данный ФКП преобразовывал желто-зеленый свет (500–600 нм) в красно-оранжевый (600–700 нм), повышая урожайность и улучшая физиологические процессы и питательный состав у растущих под ним растений. Авторы пришли к выводу, что такие ФКП могут эффективно решать проблему низкой освещенности в условиях частой дымки.

Большинство параметров состава (содержание метаболитов) должны увеличиваться с повышением качества плодов. Однако в двух статьях, например, авторы представили противоречивые результаты. У и соавторы [23] и Мола с коллегами [3] разрабатывали ФКП с люминофорами, активированными Eu. У и др. [23] сообщили о ФКП из полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) с $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$ с конверсией сине-фиолетового излучения в красное. Под действием этого ФКП у китайской цветной капусты увеличилась

высота (24,43%), ширина (19,07%), максимальная длина (15,3%) и ширина (15,6%) листа. Содержание белка, полифенолов и сахаров также увеличилось (на 9,09, 21,27 и 19,15% соответственно). Мола и коллеги [3] предложили панели из ПММА с красными и синими компонентами, а именно CaS:Eu и $\text{Sr}_4\text{Ca}_4\text{Al}_{22}\text{O}_{41}:\text{Eu}, \text{Dy}^{+3}, \text{Nd}^{+3}\text{B}_3$. Оранжево-красное излучение повлияло на салат, что привело к снижению общего содержания фенолов на 22% и увеличению содержания нитратов на 14%. Таким образом, содержание фенольных соединений увеличилось [23] и уменьшилось [3] у двух названных листовых овощей. Первая возможная причина — несколько различающееся излучение ФКП в этих двух работах. Это может по-разному влиять на растения. Другая возможная причина — момент, упомянутый во введении, а именно различное воздействие ФКП на разные растения.

В трех статьях также сообщалось об отсутствии влияния ФКП на некоторые параметры растений. Упомянутые выше Мола и соавторы [3] показали, что содержание хлорофилла, каротиноидов, аскорбиновой кислоты и антиоксидантная активность капусты не изменились под действием ФКП. Хорри и коллеги [4] исследовали влияние коммерческих красных и синих ФКП на рост и продуктивность ежевики. Они обнаружили, что ФКП усиливали фотосинтез и фертильность цветков, повышали продуктивность и не влияли на органолептические и питательные качества плодов. Мюллер и коллеги [16] приготовили распыляемые люминесцентные пластиковые пленки с полиоксотитанатами, содержащими Eu^{3+} . Преобразование УФ-излучения в ФАР с квантовым выходом 68% повлияло на базилик (увеличение сухого веса листьев) и не оказало эффекта на землянику. Это еще одно доказательство того, что эффект ФКП различен для разных растений. Это справедливо и для параметров: разные параметры, даже у одного и того же растения, по-разному реагируют на преобразованный свет.

Ли и соавторы [14] и Гао и др. [5] изучали изменение содержания гормонов под действием ФКП. Ли и др. [14] обнаружили, что под полиолефиновой пленкой, активированной европием, как экспрессия генов синтеза ауксина, так и содержание ауксина у огурца снизились. Они пришли к выводу, что свет влияет на развитие растений в первую очередь через модуляцию гормонов. Гао и коллеги [5], изучая перец под полиолефиновой пленкой, содержащей Eu, обнаружили улучшение качества плодов и заключили, что это является результатом корректировки уровня эндогенных гормонов в сезоны с низкой температурой. Однако определение содержания гормонов и анализ экспрессии генов редко выполнялись в рассмотренных статьях, и недостаточно данных для более глубоких и обобщенных выводов.

Таким образом, рост и развитие растений зависят от ФКП, но по-разному. Контролирующее влияние может оказывать тип люминофора в составе ФКП, фактические световые условия, обеспечиваемые ФКП (экранирование, пропускание, фотоконверсия), или вид растения, растущего под исследуемыми ФКП. Использование большего числа параметров роста растений для оценки эффективности ФКП может помочь составить более детальную картину процессов, индуцированных фотоконвертирующими агентами. Однако такие эксперименты все еще довольно трудоемки и ресурсоемки. Необходимо находить и поддерживать разумный баланс при проведении и анализе тепличных экспериментов для точной, компетентной и реалистичной оценки ФКП.

Что касается долгосрочной работы ФКП в реальных тепличных условиях, мы отмечаем, что статьи, проанализированные в настоящем обзоре, не содержали какой-либо информации по этой теме. Авторы либо упоминали возможную долговременную стабильность разработанных/предложенных люминофоров или самого ФКП [15], либо указывали, что это будет изучено в будущих работах [19]. Например, Кумар Барман и др. [12] предположили

долговременную стабильность модифицированных углеродными точками пленок ПВА на основе стабильности их флуоресцентных спектров через несколько дней. Чжан и др. [28], например, сообщили, что микрокапсулы с углеродными точками, покрытые ПВА, продемонстрировали снижение интенсивности флуоресценции на 25,87% на седьмой день по сравнению с первым днем, и что ФКП мог демонстрировать флуоресцентные свойства даже после 15 дней. Таким образом, долгосрочная стабильность ФКП в реальных тепличных условиях в настоящее время представляется малоизученной областью.

Вывод

На основе анализа результатов, полученных в настоящем обзоре, мы предлагаем использовать не менее восьми параметров для минимально надежной оценки эффективности ФКП. Среди них два должны характеризовать рост растений (например, размер или накопление биомассы и т.д.), далее — два параметра фотосинтетического процесса. Мы также предлагаем анализировать не менее двух параметров содержания компонентов (например, содержание питательных веществ в съедобной части растения и т.п.). Наконец, должно быть не менее двух параметров, характеризующих урожайность конечного продукта. Совокупность результатов изменения предложенных параметров у растений, выращенных под ФКП, позволит всесторонне оценить влияние покрытия на рост конкретной культуры или группы культур.

Библиографический список

1. Bagiyan M. Fabrication of smart sunlight window using silver vanadate nanorods (β -AgVO₃) and its effect on phytochemical properties of several

agricultural species / M. Bagiyan, M. Zahedifar, E. Sadeghi, R. Dehghani Bidgoli // *Luminescence*. – 2024. – Vol. 39. – P. e4850.

2. Burmistrov D.E. Cultivation of *Solanum lycopersicum* Under Glass Coated with Nanosized Upconversion Luminophore / D.E. Burmistrov, D.V. Yanykin, A.V. Simakin [et al.] // *Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 11. – P. 10726.

3. Di Mola I. Greenhouse Photoluminescent PMMA Panels Improve the Agronomical and Physiological Performances of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) / I. Di Mola, S. Conti, M. Bartak [et al.] // *Horticulturae*. – 2022. – Vol. 8. – P. 913.

4. El Horri H. Blue and Red Light Downconversion Film Application Enhances Plant Photosynthetic Performance and Fruit Productivity of *Rubus fruticosus* L. var. Loch Ness / H. El Horri, M. Vitiello, A. Braca [et al.] // *Horticulturae*. – 2024. – Vol. 10. – P. 1046.

5. Gao Y. Effects of rare-earth light conversion film on the growth and fruit quality of sweet pepper in a solar greenhouse / Y. Gao, G. Li, B. Cai [et al.] // *Front. Plant Sci.* – 2022. – Vol. 13. – P. 989271.

6. Ge M. Enhancing plant photosynthesis with dual light conversion films incorporating biomass-derived carbon dots / M. Ge, Y. Yuan, S. Liu [et al.] // *Carbon Capture Sci. Technol.* – 2024. – Vol. 13. – P. 100253.

7. Gudkov S.V. Development and application of photoconversion fluoropolymer films for greenhouses located at high or polar latitudes / S.V. Gudkov, A.V. Simakin, N.F. Bunkin [et al.] // *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* – 2020. – Vol. 213. – P. 112056.

8. Hebert D. Luminescent quantum dot films improve light use efficiency and crop quality in greenhouse horticulture / D. Hebert, J. Boonekamp, C.H. Parrish [et al.] // *Front. Chem.* – 2022. – Vol. 10. – P. 988227.

9. Ivanyuk V.V. Influence of Fluoropolymer Film Modified with Nanoscale Photoluminophor on Growth and Development of Plants / V.V. Ivanyuk, A.V. Shkirin, K.N. Belosludtsev [et al.] // *Front. Phys.* – 2020. – Vol. 8. – P. 616040.

10. Kang S. Luminescent Quantum Dot Films Increase the Radiation Capture and Yield of Lettuce and Sweet Basil Compared to a Traditional/Neutral-Density Greenhouse Glazing / S. Kang, C.H. Parrish, D. Hebert, S. Zhen // HortScience. – 2024. – Vol. 59. – P. 988–996.
11. Khramov R. Luminescence of Agrotextiles Based on Red-Light-Emitting Organic Luminophore and Polypropylene Spunbond Enhances the Growth and Photosynthesis of Vegetable Plants / R. Khramov, A. Kosobryukhov, V. Kreslavski [et al.] // Front Plant Sci. – 2022. – Vol. 13. – P. 827679.
12. Kumar Barman B. Dual roles of a transparent polymer film containing dispersed N-doped carbon dots: A high-efficiency blue light converter and UV screen / B. Kumar Barman, T. Nagao, K.K. Nanda // Appl. Surf. Sci. – 2020. – Vol. 510. – P. 145405.
13. Li J. Effects of Light Conversion Film on the Growth of Leafy Vegetables in Facilities Under Haze Weather / J. Li, L. Zhangzhong, X. Zhang [et al.] // Agronomy. – 2022. – Vol. 12. – P. 2391.
14. Li R. RPO film effectively promotes fruit quality and yield of cucumber through adjusting greenhouse environment and hormone contents / R. Li, Y. Gao, B. Cai [et al.] // BMC Plant Biol. – 2024. – Vol. 24. – P. 1250.
15. Marafeli É.A.M. Photoconverting nets affect plant growth and levels of antiviral glucoevatromonoside and total cardenolides in *Digitalis mariana* ssp. *heywoodii* (P. Silva and M. Silva) Hinz / É.A.M. Marafeli, L.A. Chibli, J.P.M. Rocha [et al.] // Ind. Crops Prod. – 2023. – Vol. 204. – P. 117348.
16. Müller R. Transparent, Sprayable Plastic Films for Luminescent Down-Shifted-Assisted Plant Growth / R. Müller, B. Okokhere-Edeghoghon, N.J. Janowicz [et al.] // Adv. Mater. Technol. – 2024. – Vol. 10. – P. 2400977.
17. Parrish C.H. Optimizing spectral quality with quantum dots to enhance crop yield in controlled environments / C.H. Parrish, D. Hebert, A. Jackson [et al.] // Commun. Biol. – 2021. – Vol. 4. – P. 124.

18. Paskhin M.O. Two Types of Europium-Based Photoconversion Covers for Greenhouse Farming with Different Effects on Plants / M.O. Paskhin, D.V. Yanykin, A.V. Popov [et al.] // *Horticulturae*. – 2023. – Vol. 9. – P. 846.
19. Sánchez-Lanuza M.B. Advanced Photonic Thin Films for Solar Irradiation Tuneability Oriented to Greenhouse Applications / M.B. Sánchez-Lanuza, A. Menéndez-Velázquez, A. Peñas-Sanjuan [et al.] // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – P. 2357.
20. Shen L. Increasing greenhouse production by spectral-shifting and unidirectional light-extracting photonics / L. Shen, R. Lou, Y. Park [et al.] // *Nat. Food*. – 2021. – Vol. 2. – P. 434–441.
21. Shoji S. Plant growth acceleration using a transparent Eu³⁺-painted UV-to-red conversion film / S. Shoji, H. Saito, Y. Jitsuyama [et al.] // *Sci. Rep.* – 2022. – Vol. 12. – P. 17155.
22. Simakin A.V. Photoconversion Fluoropolymer Films for the Cultivation of Agricultural Plants Under Conditions of Insufficient Insolation / A.V. Simakin, V.V. Ivanyuk, A.S. Dorokhov, S.V. Gudkov // *Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10. – P. 8025.
23. Wu W. Characterization and properties of a Sr₂Si₅N₈:Eu²⁺-based light-conversion agricultural film / W. Wu, Z. Zhang, R. Dong [et al.] // *J. Rare Earths*. – 2020. – Vol. 38. – P. 539–545.
24. Xu X. Agricultural light-converting anti-icing superhydrophobic coating for plant growth promotion / X. Xu, S. Shi, B. Sun [et al.] // *Chem. Eng. J.* – 2024. – Vol. 495. – P. 153286.
25. Yanykin D.V. Plant Photochemistry Under Glass Coated with Upconversion Luminescent Film / D.V. Yanykin, M.O. Paskhin, A.V. Simakin [et al.] // *Appl. Sci.* – 2022. – Vol. 12. – P. 7480.
26. Yoon H.I. Subtle changes in solar radiation under a green-to-red conversion film affect the photosynthetic performance and chlorophyll fluorescence of sweet

pepper / H.I. Yoon, J.H. Kang, W.H. Kang, J.E. Son // Photosynthetica. – 2020. – Vol. 58. – P. 1107–1115.

27. Zakharchenko N.S. Effect of Photoluminophore Light-Correcting Coatings and Bacterization by Associative Microorganisms on the Growth and Productivity of Brassica juncea L. Plants / N.S. Zakharchenko, E.B. Rukavtsova, I.V. Yampolsky [et al.] // Microbiol. Res. – 2024. – Vol. 15. – P. 1957–1972.

28. Zhang F. Quantum dot-based light conversion strategy for customized cultivation of microalgae / F. Zhang, Y. Li, X. Miao // Bioresour. Technol. – 2024. – Vol. 397. – P. 130489.

Оригинальность 81%