



## Перспективы применения пленочно-керамических фотокатализаторов для выращивания микроводорослей

Р.Х. Рахимов<sup>a</sup> ©, В.П. Ермаков<sup>b</sup> ©, Т.С. Саидвалиев<sup>c</sup> ©

Институт материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце»  
Академии наук Республики Узбекистан,  
г. Ташкент, Республика Узбекистан

<sup>a</sup> E-mail: rustam-shsul@yandex.com

<sup>b</sup> E-mail: labimanod@uzsci.net

<sup>c</sup> E-mail: t.saidvaliyev@imssolar.uz

**Аннотация.** Существует много видов микроводорослей, которые могут расти в море и пресной воде, имея в своем составе высокое содержание липидов. Липиды, содержащиеся в микроводорослях, используются для производства биотоплива, косметики, лекарств и других продуктов. Данная статья посвящена оценке оптимальных условий выращивания таких микроводорослей с учетом их индивидуальной спектральной чувствительности при максимальном использовании солнечного света. Это позволит создавать пленочно-керамические композиты, которые обеспечивают наибольший прирост биомассы при минимальном расходе воды и времени.

**Ключевые слова:** микроводоросли, фотокатализаторы, композитные пленки, реакторы, генерация, импульсное излучение, функциональная керамика

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Саидвалиев Т.С. Перспективы применения пленочно-керамических фотокатализаторов для выращивания микроводорослей // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10. № 2. С. 60–69. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-2-60-69. EDN: BTHXIR

DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-2-60-69

## Prospects for the Use of Film-Ceramic Photocatalysts for the Cultivation of Microalgae

R.Kh. Rakhimov<sup>a</sup> ©, V.P. Yermakov<sup>b</sup> ©, T.S. Saidvaliev<sup>c</sup> ©

Institute of Materials Science of the SPA "Physics-Sun" of the Academy of Science of Uzbekistan,  
Tashkent, Republic of Uzbekistan

<sup>a</sup> E-mail: rustam-shsul@yandex.com

<sup>b</sup> E-mail: labimanod@uzsci.net

<sup>c</sup> E-mail: t.saidvaliyev@imssolar.uz

**Abstract.** There are many types of microalgae that can grow in sea and fresh water, having a high lipid content in their composition. Lipids in microalgae are used for the production of biofuels, cosmetics, medicines and other products. This article is devoted to the assessment of optimal growing conditions for such microalgae, taking into account their individual spectral sensitivity

Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Саидвалиев Т.С.

in the maximum use of sunlight. This will make it possible to create film-ceramic composites that provide the greatest increase in biomass with minimal water consumption and time.

**Key words:** microalgae, photocatalysts, composite films, reactors, generation, pulsed radiation, functional ceramics

FOR CITATION: *Rakhimov R.Kh., Yermakov V.P., Saidvaliev T.S. Prospects for the Use of Film-Ceramic Photocatalysts for the Cultivation of Microalgae. Computational Nanotechnology. 2023. Vol. 10. No. 2. Pp. 60-69. (In Rus.) DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-2-60-69*

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все больше говорят о возможности использования микроводорослей в качестве источника энергии. Используется солнечный свет и углекислый газ для фотосинтеза, при этом микроводоросли быстро размножаются и создают большое количество биомассы. Однако, на конференции во Франкфурте-на-Майне, эксперт по производству энергии Ульрих Штайнер назвал такую концепцию «совершенно утопической», объяснив, что производство биогорючего из водорослей использовало бы больше энергии, чем вырабатывало, что является нецелесообразным. Многие участники сессии поддерживают использование микроводорослей в качестве источника энергии, однако есть и те, кто сомневается в его эффективности. Профессор биотехнологии Олаф Крузе видит будущее в крупномасштабном производстве, но все участники согласны, что широкое использование биотоплива из водорослей еще не наступило [1].

Целью данной статьи является рассмотрение возможностей фотокатализаторов на основе функциональной керамики и пленочно-керамических композитов существенно повысить эффективность выращивания микроводорослей и сделать процесс выскокорентабельным.

В предыдущих сообщениях, нами были представлены механизмы преобразования солнечной энергии функциональной керамикой [2], оптимальный выбор генерируемых длин волн [3], возможные схемы производства микроводорослей, в том числе и в пустынной зоне, с использованием пленочно-керамических композитов [4].

Для тепличных культур пленочно-керамический композит имеет следующие длины волн:

- 600-680 нм - для максимального фотосинтеза;
- 660 нм - переводит фитохром в активное состояние, что существенно ускоряет работу ферментов, как следствие, рост, развитие, устойчивость к заболеваниям;
- 3,2-3,6 мкм - полиэтилен не пропускает эту область спектра, что позволяет сохранять температуру в ночное время;
- 9,7-10,0 мкм - это излучение соответствует 1722 °С. Из одного высокоэнергетического фотона образуется 10-15 фотонов с такой энергией. Таким образом, происходит стабилизация температуры при ее отклонении в любую сторону от этих значений.

Микроводоросли имеют еще дополнительные пигменты, кроме фитохрома, в связи с чем требуют новых разработок композитных материалов, с учетом особенностей их спектральной чувствительности.

В первую очередь, необходимо проанализировать, какой спектр света обеспечивает максимум их роста и развития. Кроме того, нужно создать композитную пленку, генерирующую излучение с соответствующими спектральными полосами.

Производство микроводорослей интересно тем, что они могут быть использованы для производства биотоплива, а также различных продуктов, помимо этого. Например, из микроводорослей могут быть произведены косметические продукты, такие как масла и кремы, а также ингредиенты для пищевой промышленности, включая добавки и красители. Микроводоросли также могут использоваться для производства лекарственных препаратов и биополимеров. Кроме того, микроводоросли могут быть использованы для очистки воды и удаления загрязнений из окружающей среды. Они являются отличной добавкой в корма и т.д. Их производство позволяет эффективно удалять углекислый газ из атмосферы, превращая его в требуемые продукты<sup>1</sup> [5-14].

Рассмотрим виды микроводорослей с высоким содержанием липидов для выращивания в различных природных условиях. Их можно разбить на два основных класса:

- 1) микроводоросли для морской воды;
- 2) микроводоросли для пресной воды.

## МИКРОВОДОРОСЛИ ДЛЯ МОРСКОЙ ВОДЫ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛИПИДОВ

Существует множество видов микроводорослей, которые могут быть использованы для производства липидов в морской воде. Приведем некоторые из наиболее известных и исследованных в этой области видов водорослей:

<sup>1</sup> Подробнее на эту тему можно посмотреть публикации в онлайн-журнале *Algae Industry Magazine*, где публикуются новости, статьи и обзоры, связанные с производством микроводорослей и их применением в различных отраслях (URL: <https://www.algaeindustry.com/>), в научном журнале *Journal of Applied Phycology*, публикующем статьи и исследования по микроводорослям и их применению в различных отраслях (URL: <https://www.springer.com/journal/10811>), а также материалы *Algae Biomass Organization* (ABO), объединяющей компании и организации, занимающиеся производством микроводорослей и их применением в различных отраслях. Ресурс содержит много материалов о производстве микроводорослей, последних новостях и исследованиях в этой области (URL: <https://algaebiomass.org/>).

- *Nannochloropsis oceanica* - это мелкие зеленые водоросли, которые имеют высокий потенциал для производства липидов. Они могут расти в морской воде, содержащей высокую концентрацию солей;
- *Isochrysis galbana* - это золотисто-коричневые микроводоросли, которые также могут производить высокие концентрации липидов. Они могут расти в морской воде с высоким содержанием солей и имеют хорошую устойчивость к изменению температуры и освещения;
- *Tetraselmis* sp. - это зеленые водоросли, которые также могут производить липиды. Они могут расти в морской воде с высокой концентрацией солей и имеют высокую устойчивость к изменению температуры и освещения;
- *Dunaliella tertiolecta* - это зеленые водоросли, которые могут производить высокие концентрации липидов. Они могут расти в морской воде с высоким содержанием солей, но требуют более специфических условий для роста, таких как определенные уровни освещения и pH.

Это лишь некоторые из видов микроводорослей, которые могут быть использованы для производства липидов в морской воде. Конкретный вид, который лучше всего подходит для конкретной ситуации, будет зависеть от различных факторов, таких как доступность и стоимость, требования к условиям роста и т.д.

Содержание липидов в различных видах микроводорослей может варьировать в зависимости от условий их культивирования, таких как свет, температура, питательные вещества, соленость воды и другие факторы. Однако общепринятым является то, что интересующие нас виды микроводорослей имеют более высокую склонность к синтезу липидов, чем другие.

Например, некоторые исследования показывают, что *Nannochloropsis oceanica* может содержать до 50% липидов в сухом весе, *Isochrysis galbana* - до 40%, *Tetraselmis* sp. - до 30%, а *Dunaliella tertiolecta* - до 20%.

#### ПРЕСНОВОДНЫЕ МИКРОВОДОРОСЛИ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ЛИПИДОВ

Существует множество пресноводных микроводорослей, которые могут содержать высокое количество липидов. Например:

- *Chlorella* - это одноклеточная зеленая водоросль, которая может содержать до 60% жиров. Она может выращиваться при температуре от 25 до 35 °C;
- *Botryococcus* - это зеленая водоросль, которая может содержать до 75% жиров. Она может выращиваться при температуре от 20 до 30 °C;
- *Nannochloropsis* - это одноклеточная зеленая водоросль, которая может содержать до 50% жиров. Она может выращиваться при температуре от 20 до 30 °C;
- *Isochrysis* - это золотисто-коричневая водоросль, которая может содержать до 50% жиров. Она может выращиваться при температуре от 15 до 25 °C.

Температурный диапазон выращивания может варьироваться в зависимости от конкретного вида микроводорослей и условий выращивания. Однако, в целом, большинство пресноводных микроводорослей могут выращиваться при температурах от 15 до 35 °C.

Одним из наиболее известных и широко используемых видов микроводорослей является *Nannochloropsis*. Эти водоросли содержат около 50% липидов по сухому весу, что делает их привлекательным источником биотоплива и других продуктов. Кроме того, *Nannochloropsis* являются быстрорастущими и могут расти в различных условиях, что делает их оптимальным источником для промышленности.

Для выращивания микроводорослей на промышленной основе необходимы определенные условия:

- 1) микроводоросли нуждаются в свете для фотосинтеза, поэтому им необходимо обеспечить достаточное количество света;
- 2) микроводоросли нуждаются в воде и питательных веществах, таких как азот, фосфор и калий;
- 3) температура окружающей среды и pH должны быть контролируемыми и подходящими для конкретного вида микроводорослей;
- 4) выращивание микроводорослей на промышленной основе требует специализированного оборудования, такого как биореакторы и системы мониторинга;
- 5) требуется их сушка.

Идеальная производственная система для выращивания водорослей не ориентирована только на производство одного продукта. Она использует преимущества экосистемных услуг, которые могут предоставлять водоросли, и извлекает несколько продуктов из одной и той же биомассы. Это имеет как экономические, так и экологические преимущества.

На сегодняшний день существуют три разных метода производства:

- системы открытого бассейна;
- фотобиореакторы;
- ферментеры.

Каждая технология имеет свои преимущества и недостатки, и решение о том, какую из них выбрать, должно зависеть от конечного продукта, видов микроводорослей и производственных затрат.

Помимо доступности воды и солнечной радиации, важными факторами, которые следует учитывать, являются затраты на рабочую силу и энергию, поскольку они являются основными факторами производственных затрат. Пресноводные водоросли можно использовать для обработки сточных вод или в районах с избытком пресной воды. С другой стороны, ферментация легко масштабируется, дешева и интересна для «переработки» органических соединений углерода в биомассу, богатую соединениями, такими как омега-3 или антиоксиданты. Кроме того, CO<sub>2</sub> от ферментации можно использовать для повышения производительности фотобиореакторов.

**Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Саидвалиев Т.С.**

Системы открытого бассейна, как правило, дешевле в строительстве и эксплуатации, поэтому для крупномасштабного производства биомассы с низкой себестоимостью закрытые фотобиореакторы обычно считаются непригодными.

Закрытые биореакторы или ферментеры идеально подходят для выращивания высококачественных стартовых культур, которые используются для инокуляции биореакторов открытого бассейна. Кроме того, при производстве ценных продуктов закрытые фотобиореакторы обычно предпочтительнее, поскольку они более надежны и менее подвержены вредителям, чем системы открытого бассейна. Однако их использование требует больше энергии для газообмена, чтобы избежать окислительного стресса.

Чтобы помочь снизить затраты на производство больших объемов малоценных продуктов, полученных из водорослей, одновременное производство дорогостоящих продуктов из той же биомассы является наиболее экологически выгодным путем. Как побочные продукты экстракции масла или белка, из водорослей могут быть извлечены пигменты и биологически активные соединения. Главное, в этом методе экстракции необходимо использовать химические вещества, которые не окажут отрицательного воздействия на окружающую среду.

В целом, идеальная производственная система для выращивания водорослей должна быть гибкой и адаптивной, учитывая различные факторы, такие как конечный продукт, виды микроводорослей и производственные затраты. Она должна использовать преимущества экосистемы, предоставляемых водорослями, и извлекать несколько продуктов из одной и той же биомассы, чтобы улучшить экономическую эффективность и сократить воздействие на окружающую среду. Выращивание микроводорослей на суше в идеале должно происходить на непахотных землях. Доступно множество примеров систем открытых прудов или фотобиореакторов в засушливых регионах, таких как пустыня Арава, пустыня Атакама или прибрежная пустыня Марокко. Прибрежные пустыни являются хорошим местом для выращивания морских микроводорослей, поскольку пресная вода не используется, а используемая морская вода практически не ограничена. Выращивание пресноводных водорослей должно происходить либо в пригородах, в идеале в рамках очистки сточных вод из городов, либо в зонах с влажным климатом, где пресная вода не является ограниченным ресурсом. В таких районах «микрoferмы» с открытыми бассейнами могли бы помочь в борьбе с недоеданием на местном уровне и сделать фермеров независимыми от повышения цен на пахотную землю и удобрения [15; 16].

Учитывая, что Узбекистан состоит на 70% из пустынных земель, в первую очередь, разработки должны быть направлены на их освоение. В особенности, зона Арала наиболее подходящее место для выращивания микроводорослей, так как они не требуют исполь-

зования пресной воды, а морская вода в этом регионе практически не ограничена. Кроме того, это позволит улучшить экологическую и экономическую обстановку региона. Естественно, что при хорошей проработке технологии выращивания микроводорослей с применением фотокатализаторов в виде пленочно-керамического композита в условиях пустыни, это можно будет внедрить во многие регионы мира.

Устройства, которые занимают меньше всего места, - это ферментные системы, которые можно использовать для переработки менее ценных продуктов, таких как органические углеродные соединения, в более ценные продукты (полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), пигменты, кормовые добавки.

В [17-19] показано, что максимальное усвоение CO<sub>2</sub> происходит в длинноволновой области спектра (600-700 нм). Вторая спектральная зона поглощения CO<sub>2</sub> синеволновая область (380-490 нм). Зеленая область спектра не поглощается хлорофиллом, в связи с чем, эта область вносит минимальный вклад в развитие микроводорослей.

В [20] объясняется механизм спектральной чувствительности зеленой области света тем, что длины волн максимумом 550 нм, это полосы поглощения фикобилинов фикоуробилина и фикоэритробилина, входящих в состав фикобилипротеина фикоэритрина. Это связано с наличием пигмента цианобактерий, красных и криптофитовых водорослей. Именно благодаря фикоэритрину глубоководный фитопланктон поглощает проникающий свет с максимумом 500-560 нм.

В [21] исследовано влияние света на микроводоросли Северного полушария. Установлено, что увеличение интенсивности света увеличивает не только биомассу, но и содержание жирных кислот у видов *Desmodesmus* sp. и *Scenedesmus obliquus*. Также наблюдались изменения в составе жирных кислот именно тех видов, которые могут улучшить качество получаемого из них биодизеля. По мнению авторов, *Desmodesmus* sp. и *S. obliquus* являются кандидатами для подходов к оптимизации производства биомассы и биодизеля. Еще один вывод авторов заключается в том, что увеличение содержания жирных кислот сопровождалось снижением содержания белка. Это открывает широкие перспективы в «специализации» получаемых микроводорослей: можно регулировать конечный состав с заданным содержанием, как белков, так и состава жирных кислот.

Наиболее многообещающей культурой микроводорослей для выращивания в пустыне, является хлорелла. Она содержит достаточное количество липидов и может хорошо развиваться при относительно высокой температуре.

Для оптимального выращивания хлореллы важны следующие условия:

- *освещенность*: хлорелла нуждается в ярком свете, но не переносит прямое солнечное освещение. Оптимальная интенсивность света - 2000-3000 люкс;

- *pH*: оптимальный pH для хлореллы составляет 6,5-7,5;
- *температура*: хлорелла может выращиваться при температурах от 15 до 35 °С, но наиболее оптимальная температура для ее выращивания - от 25 до 30 °С. Композитные фотокатализаторы позволяют поддерживать такие температуры при существенном изменении температуры окружающей среды.
- *концентрация углекислого газа*: хлорелла использует углекислый газ для фотосинтеза. Оптимальная концентрация углекислого газа в питательной среде - 1-5%.

Помимо вышеперечисленных параметров, выращивание микроводорослей нужно обратить внимание и на следующие, общие для всех растений, факторы:

- концентрация питательных веществ в питательной среде (азот, фосфор, калий, железо и т.д.);
- объем питательной среды и интенсивность аэрации;
- микробиологический состав среды и наличие конкурирующих организмов;
- наличие контроля за качеством воды и стерильностью условий выращивания;
- возможность управления световым режимом для оптимизации фотосинтеза.

#### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На основании изложенной информации, можно сделать необходимую оценку пленочно-керамического фотокатализатора, который позволит обеспечить максимальную рентабельность производства микроводорослей за счет преобразованной солнечной энергии.

Но вначале представим результаты испытаний новых пленочно-керамических композитов, которые были получены без концентрированного солнечного излучения, а их активация, после твердофазного синтеза, проводилась под воздействием импульсов высокой плотности, генерируемых функциональной керамикой МС-1. Статья о керамике МС-1 представлена в [22]. Переход на альтернативные виды синтеза и активации обусловлен тем, что, во-первых, большая солнечная печь мощностью 1 мегаватт, не может обеспечить необходимое количество целевого материала, во-вторых, как было нами представлено в [2; 23], невозможно выбрать оптимальную длину волны для активации необходимых метастабильных состояний. Как показали наши многолетние исследования, под воздействием мощного потока фотонов с широким спектральным набором энергий можно реализовать все допустимые метастабильные состояния получаемых конечных химических соединений и осуществлять многие фотохимические процессы, которые невозможны при других методах синтеза. В тоже время, использование функциональной керамики, генерирующей импульсы с регулируемыми параметрами, позволяет из одних и тех же исходных компонентов, получать материалы с разными свойствами [24]. В данном случае, наилучшие результаты были получены при использовании для активации синтезированного материала, импульсного излучения, генерируемого МС-1.

Было синтезировано два состава для композитных пленок в соответствии с [25]. Максимумы излучений также находились в области 600-680 нм, 660 нм, 3,2-3,6 мкм, но в одном случае спектр был смещен в сторону 9,7 мкм (обозначена как ZB1), а во втором, в сторону 10 мкм (обозначена как ZB2), примерно, на 20%. Таким образом, можно рассматривать их как более «зимний» или более «летний» композиты.

Для наглядности приведем следующие результаты:

- время 14.00 часов. Наружная температура 41 °С;
- под ZB0: в теплице 41,7 °С, температура земли 30 °С, влажность 16%;
- ZB1: 39,5 °С, температура земли 23,9 °С, влажность 30%. Разница 2,2 °С;
- ZB2: 37,5 °С, температура земли 25,5 °С, влажность 19%. Разница 4,2 °С;
- УФ-индекс 10 - экстремальный.
- здесь ZB0 - обычная полиэтиленовая пленка. Для сравнения.

Обе композитные пленки содержат 0,1% масс. функциональной керамики. В действительности, оптимальное содержание керамики, синтезированной на большой солнечной печи, было 1,0-1,5%. При содержании керамики в композите менее 0,5% эффект, практически не был замечен. При активации излучением МС-1, нам удалось получить хороший эффект даже при таком низком содержании керамики. Естественно, увеличение доли такой керамики в композите, даст существенно больший эффект. В дальнейших публикациях будут представлены соответствующие результаты измерений.

На рис. 1 представлены результаты испарения влаги под различными пленками. Как следует из приведенных данных, наименьшее испарение происходит под композитом ZB1. Дополнительные измерения показали, что под композитными пленками испарение снижается в 4-6 раз, по сравнению с вариантом использования обычной полиэтиленовой пленки.

На рис. 2-4 представлены данные по росту растений под различными пленками. Как следует из приведенных данных, под композитными пленками рост и развитие растений идет значительно быстрее. Всхожесть также значительно выше, чем под обычной полиэтиленовой пленкой.

Таким образом, правильный выбор спектрального диапазона при выращивании растений, позволяет значительно ускорить их развитие. Это говорит о том, что быстрее усваивается углекислый газ, что улучшает экологическую обстановку. Применение таких композитов, позволит выращивать многие культуры, как в зонах с очень высокой температурой, так и в зонах с низкой температурой. Дополнительным бонусом является низкое испарение влаги. Проведенные нашими китайскими коллегами испытания композитной пленки при проращивании голландских бобов, показали, что всхожесть их увеличилась в 3 раза, по сравнению с обычной полиэтиленовой пленкой.



**Рис. 1.** Слева направо: ZB2, ZB0, ZB1. На фотографиях видно, что идет сильное испарение под обычной пленкой (пленка сильно запотела, не видно растений сквозь нее), меньше всего испарений под ZB1

**Fig. 1.** From left to right: Z2, ZB0, ZB1. The photos show that there is a strong evaporation under the usual film (the film is heavily fogged, plants are not visible through it), the least evaporation under ZB1



**Рис. 2.** Развитие растений под композитом ZB1

**Fig. 2.** The development of plants under the composite ZB1



**Рис. 3.** Развитие растений под композитом ZB0  
**Fig. 3.** The development of plants under the composite ZB0



**Рис. 4.** Развитие растений под композитом ZB2  
**Fig. 4.** The development of plants under the composite ZB2

Исходя из представленных выше материалов, композитная пленка для микроводорослей должна иметь следующие спектральные характеристики.

Генерация излучения 600-680 нм - для фотосинтеза. Причем, применение композитной пленки здесь

имеет большое преимущество. Связано это с тем, что хлорофилл поглощает фотон света за время  $t$ . Для усвоения этого фотона растению требуется, в среднем больше 50 периодов  $t$ . Именно этим обуславливается низкая эффективность фотосинтеза в пределах 0,5-2,0%.

**Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Саидвалиев Т.С.**

Вторым фактором, ограничивающим фотосинтез, является то обстоятельство, что есть пороговое значение интенсивности света, ниже которого фотосинтез не происходит. Импульсное излучение в области 600-680 нм, генерируемое функциональной керамикой, позволяет с лихвой преодолеть этот уровень освещенности в пасмурные дни, вечернее и раннее утреннее время. Благодаря этому, растения развиваются очень быстро.

Генерация излучения 660 нм - для перевода фитохрома в активное состояние. Благодаря этому, ферменты, ответственные за рост и развитие растений значительно активируются. В результате, наблюдается быстрый рост и развитие растений, а также повышается их устойчивость к заболеваниям.

Несмотря на то, что в [17-19] показан максимум усвоения CO<sub>2</sub> в длинноволновой области спектра (600-700 нм), как показали наши исследования, излучение с длиной волны 700 нм уже начинает заметно подавлять активность фитохрома. В связи с этим, мы ограничиваемся диапазоном излучения 600-680 нм.

В соответствии с литературными данными, вторая спектральная зона поглощения CO<sub>2</sub> сине-фиолетовая область (380-490 нм). Для тепличных овощей эта область не имеет важного значения, поэтому, мы ее не использовали в пленочно-керамических композитах для теплиц. Для микроводорослей эта часть световой энергии по данным [19], имеет активность до 30%. Применение импульсной генерации в этом спектральном диапазоне, позволит обеспечить необходимую плотность излучения, что будет способствовать развитию микроводорослей.

В [20] показано, что длины волн максимумом 550 нм, соответствуют полосам поглощения фикобилин и фикоэритробилина, входящих в состав фикобилипротеина фикоэритрина. Это связано с наличием пигмента цианобактерий, красных и криптофитовых водорослей. Именно благодаря фикоэритрину глубоководный фитопланктон поглощает проникающий свет с максимумом 500-560 нм. Следовательно, композитный фотокатализатор должен генерировать излучение с максимумом 500-560 нм. В этом случае, также благодаря импульсному излучению, проникновение в глубоководные слои будет гораздо выше, что приведет к более эффективному использованию солнечной энергии микроводорослями.

Как уже отмечалось, хлорелла нуждается в ярком свете, но не переносит прямое солнечное освещение. Оптимальная интенсивность света - 2000-3000 люкс. Композит позволяет легко достичь такой интенсивности в импульсе.

Кроме того, температура: хлорелла может выращиваться при температурах от 15 до 35 °С, но наиболее оптимальная температура для ее выращивания - от 25 до 30 °С. Композитные фотокатализаторы позволяют поддерживать такие температуры при

значительном изменении температуры окружающей среды.

Генерация излучения с длиной волны 3,2-3,6 мкм, также необходима. Даже в летнее время температура ночью в пустыне снижается, иногда до 0 °С. Полиэтиленовая пленка непрозрачна в этом диапазоне, благодаря чему, тепло будет хорошо сохраняться в ночное время и при низкой температуре окружающей среды.

Генерация излучения с длиной волны 9,7-10,0 мкм, позволяет стабилизировать температуру в реакторах. Кроме того, можно получить 20 и более фотонов с такой энергией из ультрафиолетовой части солнечного спектра, так как для роста и развития микроводорослей, ее не требуется.

Второй стадией в производстве микроводорослей, является его сушка. Нами был предложен пленочно-керамический композит для эффективной сушки различных биообъектов за счет солнечной энергии [26]. Благодаря наличию такого композита, процесс сушки может быть осуществлен с полным сохранением всех активных веществ. Кроме того, получаемую в процессе сушки воду, можно будет использовать повторно, что очень важно для пустынных зон.

Применение композитов позволяет также осуществлять низкотемпературную стерилизацию, что позволит получать высококачественный продукт.

#### **Выводы**

На основе изложенного материала, можно сделать следующие выводы:

- 1) правильный выбор генерации фотокатализаторов для выращивания микроводорослей, позволяет получить ряд преимуществ по сравнению с применением других защитных световых ограждений;
- 2) ускоряется рост и развитие;
- 3) удлиняется фактический световой день для фотосинтеза;
- 4) стабилизируется температура;
- 5) снижается испарение влаги;
- 6) осуществляется низкотемпературная стимуляция;
- 7) повышается эффективность использования солнечной энергии;
- 8) повышается надежность реакторов;
- 9) обеспечивается эффективная сушка за счет энергии Солнца;
- 10) решаются некоторые экологические и экономические проблемы;
- 11) позволяет осваивать пустыни и восстанавливать зону Арала;
- 12) создаются новые рабочие места.

И это далеко не полный перечень преимуществ, которые может дать предлагаемая технология. Стоит вспомнить хотя бы продукты, которые можно получить, благодаря микроводорослям.



Литература

1. Энергия из водорослей - реальная перспектива или утопия? URL: <https://www.dw.com/ru/энергия-из-водорослей-реальная-перспектива-или-утопия/a-5204759>
2. Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Рахимов М.Р. Фононный механизм преобразования в керамических материалах // Computational Nanotechnology. 2017. № 4. С. 21-35.
3. Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Рахимов М.Р., Мухторов Д.Н. Возможности полиэтилен-керамического композита в сравнении с полиэтиленовой пленкой в реальных условиях эксплуатации // Computational Nanotechnology. 2022. Т. 9. № 2. С. 67-72. DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-2-67-72
4. Рахимов Р.Х., Петер Дж., Ермаков В.П., Рахимов М.Р. Перспективы применения полимер-керамического композита в производстве микроводорослей // Computational Nanotechnology. 2019. Т. 6. № 4. С. 44-48. DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-4-44-48
5. Иванова П.В., Наталья А.А. Микроводоросли как источник альтернативного топлива // Молодой ученый. 2020. № 22 (312). С. 591-594. URL: <https://moluch.ru/archive/312/70907/>
6. Гун Я., Цян М. Производство биодизеля с использованием микроводорослей. <https://tr-page.yandex.ru/translate?lang=en-ru&url=https%3A%2F%2Fpubmed.ncbi.nlm.nih.gov%2F21380528%2F>
7. Микроводоросли - перспективная «сельскохозяйственная культура». URL: <https://infoindustria.com.ua/mikrovodorosli-perspektivnaya-selskohozyaystvennaya-kultura>
8. Биотопливо из водорослей. URL: <https://vseonauke.com/264166560222153076/biotoplivo-iz-vodoroslej/>
9. Микроводоросли источник альтернативного топлива. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrovodorosli-istochnik-alternativnogo-topliva>
10. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel' O.S. Efficiency of the biodiesel production from microalgae // Thermal Engineering. 2014. Vol. 61. No. 6. Pp. 399-405.
11. Микроводоросли для биодизельного топлива. URL: <https://www.vo-da.ru/articles/energoeffektivnye-los/mikrovodorosli-v-biotoplive>
12. Технология получения продуктов из микроводорослей. URL: <https://lifelib.info/microbiology/microalgae/4.html>
13. Plohn M., Spain O., Sirin S. et al. Wastewater treatment // Physiol. Plant. 2021. No. 173 (2). Pp. 568-578. DOI: 10.1111/ppl.13427
14. Оценка эффективности использования микроводорослей для очистки и доочистки модельных сточных вод от ионов тяжелых металлов. URL: <https://uios.fedcdo.ru/ocenka-effektivnosti-ispolzovaniya-mikrovodoroslej-dlya-ochistki-i-doochistki-modelnyh-stochnyh-vod-ot-ionov-tyazhelyh-metallov/>
15. Обзор процессов, способов и оборудования для сушки и экстракции водорослей. URL: <https://sushilka22.ru/articles/vyrashchivanie-i-pererabotka-vodoroslei>
16. Озеленение пустынь. URL: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/fakty-mnenija-komentarii/ozelenenie-pustyn-prosto-dobav-vody.html>
17. Геворгиз Р.Г., Шматок М.Г. Лелеков А.С. Расчет КПД фотобиосинтеза у низших фототрофов. 1. Непрерывная культура // Экология моря. 2005. Вып. 70. С. 31-36.
18. Геворгиз Р.Г., Малахов А.С. Пересчет величины освещенности фотобиореактора в величину облученности: учеб.-метод. пособие. Севастополь: ООО «Колорит», 2018. 60 с.

References

1. Energy from algae - a real prospect or utopia? URL: <https://www.dw.com/ru/энергия-из-водорослей-реальная-перспектива-или-утопия/a-5204759>
2. Rakhimov R.Kh., Ermakov V.P., Rakhimov M.R. Phonon transformation mechanism in ceramic materials. *Computational nanotechnology*. 2017. No. 4. Pp. 21-35. (In Rus.)
3. Rakhimov R.Kh., Ermakov V.P., Rakhimov M.R., Mukhtorov D.N. The possibilities of a polyethylene-ceramic composite in comparison with a polyethylene film in real operating conditions. *Computational nanotechnology*. 2022. Vol. 9. No. 2. Pp. 67-72. (In Rus.) DOI: 10.33693/2313-223X-2022-9-2-67-72
4. Rakhimov R.Kh., Peter J., Ermakov V.P., Rakhimov M.R. Prospects for the use of polymer-ceramic composite in the production of microalgae. *Computational nanotechnology*. 2019. Vol. 6. No. 4. Pp. 44-48. (In Rus.) DOI: 10.33693/2313-223X-2019-6-4-44-48
5. Ivanova P.V., Natalina A.A. Microalgae as a source of alternative fuel. *A Young Scientist*. 2020. No. 22 (312). Pp. 591-594. (In Rus.) URL: <https://moluch.ru/archive/312/70907/>
6. Gong Ya., Jiang M. Biodiesel production using microalgae. URL: <https://tr-page.yandex.ru/translate?lang=en-ru&url=https%3A%2F%2Fpubmed.ncbi.nlm.nih.gov%2F21380528%2F>
7. Microalgae is a promising agricultural crop. URL: <https://infoindustria.com.ua/mikrovodorosli-perspektivnaya-selskohozyaystvennaya-kultura>
8. Biofuels from algae. URL: <https://vseonauke.com/264166560222153076/biotoplivo-iz-vodoroslej/>
9. Microalgae is a source of alternative fuel. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikrovodorosli-istochnik-alternativnogo-topliva>
10. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel' O.S. Efficiency of the biodiesel production from microalgae. *Thermal Engineering*. 2014. Vol. 61. No. 6. Pp. 399-405.
11. Microalgae for biodiesel. URL: <https://www.vo-da.ru/articles/energoeffektivnye-los/mikrovodorosli-v-biotoplive>
12. Technology for obtaining products from microalgae. URL: <https://lifelib.info/microbiology/microalgae/4.html>
13. Plohn M., Spain O., Sirin S. et al. Wastewater treatment. *Physiol. Plant*. 2021. No. 173 (2). Pp. 568-578. DOI: 10.1111/ppl.13427
14. Evaluation of the effectiveness of the use of microalgae for purification and post-treatment of model wastewater from heavy metal ions. URL: <https://uios.fedcdo.ru/ocenka-effektivnosti-ispolzovaniya-mikrovodoroslej-dlya-ochistki-i-doochistki-modelnyh-stochnyh-vod-ot-ionov-tyazhelyh-metallov/>
15. Overview of processes, methods and equipment for drying and extraction of algae. URL: <https://sushilka22.ru/articles/vyrashchivanie-i-pererabotka-vodoroslei>
16. Landscaping of deserts. URL: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/fakty-mnenija-komentarii/ozelenenie-pustyn-prosto-dobav-vody.html>
17. Gevorgiz R.G., Shmatok M.G., Lelekov A.S. Calculation of photobiosynthesis efficiency in lower phototrophs. 1. Continuous culture. *Ecology of the Sea*. 2005. Issue 70. Pp. 31-36. (In Rus.)
18. Gevorgiz R.G., Malakhov A.S. Recalculation of the illumination value of the photobioreactor into the irradiation value: Textbook. Sevastopol: LLC "Kolorit", 2018. 60 p.

**Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Саидвалиев Т.С.**

19. Влияние спектрального состава света на продуктивность и биохимический состав микроводорослей. URL: <https://uios.fedcdo.ru/vliyanie-spektralnogo-sostava-sveta-na-produktivnost-i-biohimicheskij-sostav-mikrovodoroslej/>
20. *Ефимова Т.В.* Действие спектрального состава света на структурные и функциональные характеристики микроводорослей: автореф. дис. URL: <https://www.dissercat.com/content/deistvie-spektralnogo-sostava-sveta-na-strukturnye-i-funktsionalnye-kharakteristiki-mikrovod>
21. *Nzayisenga J.C., Farge X., Groll S.L., Sellstedt A.* Effects of light intensity on growth and lipid production in microalgae grown in wastewater // *Biotechnology for Biofuels*. 2020. Vol. 13. Art. No. 4.
22. *Рахимов Р.Х., Ермаков В.П., Рахимов М.Р.* Применение функциональной керамики в процессах стерилизации // *Computational Nanotechnology*. 2021. Т. 8. № 1. С. 84-94. DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2021-8-1-84-94>
23. *Рахимов Р.Х.* Большая солнечная печь // *Computational Nanotechnology*. 2019. Т. 6. № 2. С. 141-150. DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-2-141-150>
24. *Рахимов Р.Х., Рашидов Х.К., Ермаков В.П.* и др. Особенности синтеза функциональной керамики с комплексом заданных свойств радиационным методом. Часть 4 // *Computational Nanotechnology*. 2016. № 2. С. 77-80.
25. *Rakhimov R.Kh., Kim E.V.* Патент США № 5,472,720. Дата регистрации 05.12.1995.
26. *Рахимов Р.Х., Мухторов Д.Н.* Исследование пленочно-керамического композита в гелиосушке // *Computational Nanotechnology*. 2022. Т. 9. № 1. С. 132-138. DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2022-9-1-132-138>
19. The effect of the spectral composition of light on the productivity and biochemical composition of microalgae. URL: <https://uios.fedcdo.ru/vliyanie-spektralnogo-sostava-sveta-na-produktivnost-i-biohimicheskij-sostav-mikrovodoroslej/>
20. *Efimova T.V.* The effect of the spectral composition of light on the structural and functional characteristics of microalgae: Abstract of dis. URL: <https://www.dissercat.com/content/deistvie-spektralnogo-sostava-sveta-na-strukturnye-i-funktsionalnye-kharakteristiki-mikrovod>
21. *Nzayisenga J.C., Farge X., Groll S.L., Sellstedt A.* Effects of light intensity on growth and lipid production in microalgae grown in wastewater // *Biotechnology for Biofuels*. 2020. Vol. 13. Art. No. 4.
22. *Rakhimov R.Kh., Ermakov V.P., Rakhimov M.R.* Application of functional ceramics in sterilization processes. *Computational nanotechnology*. 2021. Vol. 8. No. 1. Pp. 84-94. (In Rus.) DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2021-8-1-84-94>
23. *Rakhimov R.Kh.* Big solar furnace. *Computational nanotechnology*. 2019. Vol. 6. No. 2. Pp. 141-150 (In Rus.) DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2019-6-2-141-150>
24. *Rakhimov R.Kh., Rashidov Kh.K., Ermakov V.P.* et al. Features of the synthesis of functional ceramics with a set of specified properties by the radiation method. Part 4. *Computational nanotechnology*. 2016. No. 2. Pp. 77-80. (In Rus.)
25. *Rakhimov R.Kh., Kim E.V.* US Patent No. 5,472,720. Registration date 5.12.1995.
26. *Rakhimov R.Kh., Mukhtorov D.N.* Investigation of a film-ceramic composite in a solar cell. *Computational nanotechnology*. 2022. Vol. 9. No. 1. Pp. 132-138. (In Rus.) DOI: <https://doi.org/10.33693/2313-223X-2022-9-1-132-138>

Статья проверена программой Антиплагиат

Рецензент: *Раджапов С.А.*, доктор физико-математических наук; ведущий научный сотрудник Физико-технического института НПО «Физика-Солнце» АН РУз (Ташкент, Республика Узбекистан)

Статья поступила в редакцию 14.05.2023, принята к публикации 20.06.2023 The article was received on 14.05.2023, accepted for publication 20.06.2023

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Рахимов Рустам Хакимович**, доктор технических наук; заведующий лабораторией № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>; E-mail: [rustam-shsul@yandex.com](mailto:rustam-shsul@yandex.com)

**Ермаков Владимир Петрович**, старший научный сотрудник лаборатории № 1 Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0632-6680>; E-mail: [labimanod@uzsci.net](mailto:labimanod@uzsci.net)

**Саидвалиев Темур Саидганиевич**, главный инженер Института материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан. Ташкент, Республика Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6473-9214>; E-mail: [t.saidvaliyev@imssolar.uz](mailto:t.saidvaliyev@imssolar.uz)

## About the authors

**Rustam Kh. Rakhimov**, Doctor of Engineering; Head at the Laboratory No. 1 of the Institute of Materials Science of the SPA “Physics-Sun” of the Academy of Science of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6964-9260>; E-mail: [rustam-shsul@yandex.com](mailto:rustam-shsul@yandex.com)

**Vladimir P. Yermakov**, senior research at the Laboratory No. 1 of the Institute of Materials Science of the SPA “Physics-Sun” of the Academy of Science of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0632-6680>; E-mail: [labimanod@uzsci.net](mailto:labimanod@uzsci.net)

**Temur S. Saidvaliev**, chief engineer at the Institute of Materials Science of the SPA “Physics-Sun” of the Academy of Science of Uzbekistan. Tashkent, Republic of Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6473-9214>; E-mail: [t.saidvaliyev@imssolar.uz](mailto:t.saidvaliyev@imssolar.uz)