

УДК 582.263; 547.458

ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ФОТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПУТЬ К ДОСТИЖЕНИЮ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ ГОРОДСКИМИ АГЛОМЕРАЦИЯМИ

© 2023 г. П. М. Готовцев^{1,2,*}, К. В. Горин¹, Я. Э. Сергеева^{1,2}, Ю. М. Парунова¹,
М. В. Вишневская¹, Д. В. Сухинов¹, М. Г. Петрова^{1,3}, А. С. Мигалев¹,
В. М. Пожидаев¹, Т. Н. Гаева¹, Р. Г. Василев¹

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Россия

³Московский политехнический университет, Москва, Россия

*E-mail: Gotovtsev_PM@nrcki.ru

Поступила в редакцию 05.10.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принята к публикации 12.12.2022 г.

Значительная часть мирового населения живет в городских агломерациях. Высокая плотность застройки, большое количество автотранспорта, промышленных предприятий негативно влияют как на качество воздуха в самом городе, так и на климат в целом, выделяя значительное количество углекислого газа. В связи с этим возникает необходимость не только пересмотреть структуру развития городов и стратегии их озеленения, но и предложить новые технологии, кардинально меняющие экологическую ситуацию. В качестве такой технологии рассматриваются решения, использующие фототрофные микроорганизмы. Показано, что фотобиореакторы для их культивирования могут быть успешно интегрированы в городские системы, при этом помимо очистки воздуха может решаться задача очистки поверхностных сточных вод для их дальнейшего использования. Широкий спектр продуктов, получаемых из биомассы фототрофных микроорганизмов, существенно повышает экономическую привлекательность данного подхода. Современные технологии в области интернета вещей позволяют успешно интегрировать фотобиореакторы в городскую цифровую среду.

DOI: 10.56304/S199272232301003X

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Роль фотобиореакторов в городских агломерациях

1.1. Интеграция в городские цифровые системы

1.2. Продукты, получаемые из биомассы фототрофных микроорганизмов

Заключение

ВВЕДЕНИЕ

Практически 55% мирового населения проживает в городских агломерациях и ожидается, что к 2050 г. эта величина достигнет 70% [1]. Быстрый прогресс в области автоматизации и механизации сельского хозяйства приводит к тому, что для производства пищевых продуктов требуется все меньше рабочих рук, а значит, все больше людей перемещается в города, ускоряя процесс урбани-

зации. Бурный рост городов приводит к необходимости решения широкого спектра проблем по обеспечению населения комфортными условиями жизни и снижению негативного влияния городов на окружающую среду. Одним из критических показателей, позволяющих судить об экологическом благополучии, является выброс парниковых газов, в первую очередь диоксида углерода. Отметим, что речь идет не только о влиянии выбросов диоксида углерода на глобальные климатические процессы, но и о воздействии его повышенных концентраций на здоровье жителей города. Очевидным решением по снижению выбросов является озеленение городов. Современные концепции в этой области строятся на озеленении всех улиц, создании многочисленных скверов, парковых зон, зеленых дворов, “зеленых” крыш домов и т.д. [2, 3], которые также играют важную рекреационную роль для жителей города. Массовое озеленение, между тем, имеет определенные ограничения, связанные с недо-

статком свободных площадей для размещения высших растений [2, 4], с учетом современных тенденций городского планирования. В настоящее время такое планирование осуществляется исходя из концепции 15-минутного города, когда любой житель может в течение примерно пятнадцати минут достигать наиболее актуальных в своей повседневной активности точек: магазинов, аптек, поликлиник, мест досуга и т.д. [5, 6]. Увеличенное расстояние до таких мест приводит к перегруженности общественного транспорта, росту автомобилизации, что способствует увеличению выбросов углекислого газа и вызывает потребность в дальнейшем расширении площади города за счет новой автомобильной инфраструктуры [2, 3, 7]. В силу данных обстоятельств высокую актуальность получает задача разработки и применения в условиях города технологии, позволяющей достаточно быстро фиксировать значительные количества углекислого газа, органично встраиваясь при этом в городскую инфраструктуру. В качестве такой технологии активно обсуждаются фотобиореакторы для культивирования фототрофных микроорганизмов, что объясняется их способностью быстрее, чем высшие растения, наращивать биомассу и тем самым более активно фиксировать углекислый газ [8–10].

Целью данной работы является детальный анализ научной литературы о возможных путях применения фотобиореакторов как систем, эффективно поглощающих углекислый газ в условиях города и интегрированных в различные городские системы, а также определение наиболее оптимальных направлений по переработке получаемой биомассы фототрофных микроорганизмов.

1. РОЛЬ ФОТОБИОРЕАКТОРОВ В ГОРОДСКИХ АГЛОМЕРАЦИЯХ

Наиболее распространенным подходом к размещению фотобиореакторов в городе является их использование в виде фасадных конструкций или в беседках и других малых архитектурных формах [11–13]. Обсуждается возможность расположения фотобиореакторов на крышах зданий, для создания “зеленых” крыш в комбинации с уже выращиваемыми высшими растениями [14, 15]. Наряду с поиском новых решений для использования высших растений активно развиваются технологии по применению фотобиореакторов для культивирования фототрофных микроорганизмов в комбинации с небольшими уличными конструкциями и системами вертикального озеленения [9, 16].

При культивировании фототрофных микроорганизмов в фотобиореакторах в контексте городского применения необходимо выделить три важных аспекта [17–19]:

- подготовка воды для приготовления питательной среды для культивирования, а также источник этой воды;
- процесс фиксации углекислого газа в ходе роста биомассы;
- продукты, получаемые из биомассы, и их использование в городском хозяйстве.

Культивирование фототрофных микроорганизмов требует значительного количества воды, так как итоговые концентрации биомассы составляют несколько грамм в литре [20, 21]. Согласно [22] возможно повторное использование среды для культивирования, в том числе при сборе биомассы флокулянтами, что существенно снижает потребность фотобиореакторов в воде. Однако важен и источник используемой воды, особенно для регионов с дефицитом пресной воды. В качестве наиболее популярного источника воды обсуждаются переработанные хозяйственно-бытовые сточные воды, поскольку фототрофные микроорганизмы, как было показано, сами по себе могут играть существенную роль в их переработке [23–26]. Другим источником могут быть дождевые и талые воды, при этом процесс культивирования может выступать как основная стадия очистки этих вод, с учетом того, что фототрофные микроорганизмы могут фиксировать органические примеси и тяжелые металлы [27–29]. Следовательно, расположенные в городе фотобиореакторы могут рассматриваться в качестве ключевого компонента системы очистки поверхностных сточных вод, которые в дальнейшем можно направлять на различные нужды, не связанные с гигиеной и питанием. Возможность использования фототрофных микроорганизмов в городском хозяйстве не только для очистки воздуха и фиксации углекислого газа, но и в качестве средства для очистки поверхностных сточных вод является существенным преимуществом технологий на основе фототрофных микроорганизмов.

С учетом современных подходов к городскому водопользованию [30–32] в табл. 1 собраны основные потенциальные источники водоснабжения для применяемых в городских агломерациях фотобиореакторов.

При использовании талых вод необходимо обращать внимание на возможное присутствие солей, используемых в качестве антиобледенительного реагента. Повышенную соленость, во многих случаях характерную для стока талых вод [33], необходимо учитывать при выборе штаммов фототрофных микроорганизмов. Поскольку ряд микроорганизмов в процессе роста снижает соленость культуральной среды [34–36], возможно

Таблица 1. Перспективные источники водоснабжения для применяемых в городских условиях фотобиореакторов

| Источник | Предочистка перед использованием в фотобиореакторах | Роль фотобиореакторов | Последующее использование воды |
|-----------------------------------|---|--|---|
| Хозяйственно-бытовые сточные воды | Фильтрующие решетки и отстойники-осадители | Миксотрофное культивирование с удалением части органических примесей | Технические нужды, полив территорий и т.д. |
| Дождевые сточные воды | Грубая механическая фильтрация | Удаление органических примесей, тяжелых металлов и микрочастиц | Технические нужды, полив территорий и т.д. Сельскохозяйственные нужды Повторное использование воды в фотобиореакторах |
| Талые сточные воды | Грубая механическая фильтрация | Удаление органических примесей, тяжелых металлов и микрочастиц | Технические нужды, полив территорий и т.д. Сельскохозяйственные нужды Повторное использование воды в фотобиореакторах |
| Вода из поверхностных источников | Грубая механическая фильтрация | Удаление органических примесей, тяжелых металлов и микрочастиц | Технические нужды, полив территорий и т.д. Сельскохозяйственные нужды Повторное использование воды в фотобиореакторах |

рассмотреть их использование в тех системах, источником водоснабжения для которых являются засоленные сточные воды. Использование поверхностного источника водоснабжения имеет смысл только в том случае, если нет возможности повторно использовать какие-либо сточные воды.

Еще одним вариантом интеграции фотобиореакторов в городские системы является создание фотобиотопливных элементов, у которых катод помещен в фотобиореактор, а анод – в хозяйственно-бытовые сточные воды [37, 38]. Подобный фотобиотопливный элемент позволяет генерировать электричество, разрушая органические соединения в хозяйственно-бытовых сточных водах [39, 40]. В таких системах критическим элементом является разделение анодных и катодных камер устройства. Сегодня для этих целей используются достаточно дорогие протонпроводящие мембраны, однако ведется поиск более дешевых подходов, чтобы сделать данную технологию массовой [38, 41]. В ближайшем будущем можно ожидать появления пилотных систем, в том числе включенных в инженерные системы зданий.

Существует значительное количество различных конструкций фотобиореакторов, многие из которых могут быть использованы в городских

условиях. Как правило, основной акцент делается на трубчатые фотобиореакторы или фотобиореакторы в виде панелей, размещенных на фасаде здания [21, 42, 43]. Размещение фотобиореакторов требует создания и локализации в здании ряда дополнительных систем: циркуляции культуральной среды и сбора биомассы, приготовления культуральной среды, аэрации фотобиореакторов и при необходимости искусственного освещения [43]. Отметим, что фотобиореакторы могут быть интегрированы с городской иллюминацией и подсветкой. Такое решение приведет к существенному снижению дополнительных затрат электроэнергии на работу фотобиореакторов.

1.1. Интеграция в городские цифровые системы

Современный город сегодня – это цифровая среда, наполненная множеством систем различного назначения: от контроля климата до управления инженерными системами или трафиком [44]. В основе такой тотальной цифровизации лежит концепция городского интернета вещей, которая позволяет создать гибкую, высокоэффективную и защищенную систему управления городом практически в режиме реального времени [45, 46]. Внедрение любой новой технологии в городскую среду должно включать в себя ее инте-

грацию и в данные цифровые системы [47, 48]. Так как технологии с использованием фототрофных микроорганизмов кардинально влияют на качество воздуха и на городское водопользование, то необходимо, чтобы они были включены в городской интернет вещей [49]. При этом наличие больших объемов данных о локальном составе воздуха, температурных параметрах и освещении может обеспечить возможность широкого использования в фотобиореакторах систем автоматического управления, основанных на применении искусственных нейронных сетей, в частности, для прогнозирования перспектив наработки каких-либо ценных веществ в биомассе микроорганизмов [10, 50]. В [53–55] представлены результаты исследований, показывающих возможность прогнозирования роста фототрофных микроорганизмов в различных фотобиореакторах с использованием подходов на основе машинного обучения. Большие объемы данных, структурированные в эффективные обучающие наборы, уже сейчас позволяют активно использовать методы машинного обучения с целью создания алгоритмов для систем управления различными технологическими процессами [51, 52]. Так, в [56] показано, что с помощью алгоритмов на основе искусственных нейронных сетей можно с высокой точностью оптимизировать выход С-фиксациана при культивировании цианобактерий.

На рис. 1 представлены факторы, оказывающие влияние на фотобиореакторы, работающие в городских условиях. Поскольку расположенные на фасаде здания фотобиореакторы участвуют в климатической системе здания, на их работу может оказывать воздействие, в частности, потребность в комфортной температуре находящихся в здании людей. Локальные изменения погоды труднопрогнозируемы и тоже оказывают существенное влияние на рост биомассы. Для обеспечения эффективной работы фотобиореактора в таких условиях необходимы данные, поступающие не только с имеющихся у него сенсоров, но и с датчиков здания, где он расположен, а также локальные климатические данные, включая прогнозируемые, наряду с информацией о составе воздуха [10]. Дополнительно необходимы сведения о составе подаваемой в фотобиореактор дождевой воды, которая может использоваться для получения культуральной среды, и о составе воды, получаемой после прохождения через фотобиореакторы, в случае ее повторного использования для технических нужд. В роли источников информации в ближайшей перспективе могут выступать и сами микроорганизмы: методы синтетической биологии уже позволяют создавать клетки-сенсоры, выходным сигналом которых является флуоресценция или люминесценция, фиксируемая стандартными физическими датчиками [57, 58]. Такие клетки-сенсоры могут предо-

ставлять информацию о состоянии внутриклеточных процессов, не дожидаясь, пока их последствия отразятся на состоянии культуры или будут детектируемы в культуральной среде [10, 57].

Таким образом, фотобиореакторы становятся гармоничной частью не только инженерных, но и информационных городских систем.

1.2. Продукты, получаемые из биомассы фототрофных микроорганизмов

В последние годы при рассмотрении приоритетных направлений применения фототрофных микроорганизмов все больше внимания уделяется задаче производства веществ с высокой добавленной стоимостью. Результаты ряда проведенных исследований по использованию биомассы фототрофных микроорганизмов для получения биотоплива, кормовых добавок и прочего показали, что коммерчески жизнеспособными данные процессы могут стать лишь при получении сразу нескольких продуктов, а именно, если предварительно из биомассы фототрофных микроорганизмов будут извлечены вещества с высокой добавленной стоимостью.

Термин “вещества с высокой добавленной стоимостью” обобщает широкий спектр биологически активных соединений, синтезируемых фототрофными микроорганизмами. Наряду с первичными метаболитами фототрофные микроорганизмы синтезируют и накапливают вторичные метаболиты – органические молекулы (соединения), которые не являются необходимыми для нормального роста, размножения и развития организмов. Чаще всего эти соединения вырабатываются в стрессовых условиях вследствие активации защитных механизмов клетки.

На данный момент фототрофные микроорганизмы рассматриваются в качестве продуцентов биологически активных соединений широкого спектра действия. Отметим, что о питательной ценности, например, цианобактерий известно с давних времен. Так, *Spirulina* входила в состав рациона ацтеков, а коренное население Чада до сих пор использует высушенные лепешки спирулины в качестве одного из основных источников пищи. Помимо пищевой и пробиотической ценности биомасса фототрофных микроорганизмов, в том числе цианобактерий, является источником метаболитов, применяемых в биотехнологической и фармацевтической областях. Большинство видов биологической активности, описанных для компонентов биомассы фототрофных микроорганизмов, связаны с потенциальными медицинскими применениями, обладая антибактериальным, противогрибковым, противораковым, иммунодепрессивным и противотуберкулезным действиями.



Рис. 1. Факторы, которые влияют на фотобиореакторы, работающие в городских условиях.

В общем случае вещества с высокой добавленной стоимостью, полученные из биомассы фототрофных микроорганизмов, могут использоваться в фармакологии, косметологии, сельском хозяйстве и пищевой промышленности.

Анализ литературных данных показал, что для производства биоактивных вторичных метаболитов используется более 30 родов фототрофных микроорганизмов, при этом более 75% продукции, полученной из биомассы фототрофных микроорганизмов, предназначено для пищевых целей: пищевых продуктов, кормов и нутрицевтиков.

Согласно [59] в настоящее время на мировом рынке доминируют четыре типа фототрофных микроорганизмов: *Arthrospira* (свыше 12000 тонн биомассы в год), *Chlorella* (5000 т/год), *Dunaliella salina* (3000 т/год) и *Aphanizomenon* (1500 т/год). В последнее время на рынке активно продвигается *Scenedesmus*. Все упомянутые организмы признаны безопасными и ценными для потребления человеком.

Белки, пептиды и аминокислоты. В зависимости от вида микроорганизма и факторов окружающей среды содержание белка в клетках фототрофных микроорганизмов колеблется от 6 до 70% их сухого веса, хотя в большинстве случаев уровень белка составляет ~50%. Благодаря высокому содержанию белка в биомассе фототрофные

микроорганизмы, главным образом *Arthrospira*, *Chlorella* и *Dunaliella salina*, считаются перспективным альтернативным источником белка для потребления человеком. Более того, согласно прогнозам к 2054 г. ~50% рынка заменителей белка будет приходиться на долю белка, получаемого из микроводорослей и цианобактерий [60]. Белки, синтезируемые фототрофными микроорганизмами, в зависимости от аминокислотного состава нашли наиболее широкое применение в пищевой, фармацевтической и косметической областях.

Углеводы (полисахариды). Углеводы фототрофных микроорганизмов обычно состоят из смеси нейтральных сахаров, аминсахаров и урановых кислот. На основе выполняемой функции многочисленные внутриклеточные полисахариды можно разделить на запасные (обеспечивают энергией метаболические процессы), структурные (входят в состав клеточной стенки) и участвующие в клеточных коммуникациях. Только первые две категории представляют интерес с точки зрения биотехнологии: запасные полисахариды исследовались главным образом в контексте производства биотоплива, структурные — наряду с их использованием в качестве загустителей или гелеобразователей весьма перспективны для применения в фармацевтике, косметике и пищевых продуктах. Известно, что некоторые полиса-

хариды обладают биосурфактантной активностью, используемой для биоремедиации воды и почвы.

Кроме того, некоторые фототрофные микроорганизмы синтезируют экзополисахариды – внеклеточные полимерные вещества, имеющие более сложную структуру по сравнению с внутриклеточными [61]. Экзопалисахариды, продуцируемые микроводорослями и цианобактериями, были предметом многочисленных публикаций, посвященных их биологической активности, включая антиоксидантное, противовирусное, противогрибковое, антибактериальное, омолаживающее, противораковое и иммуномодулирующее действие.

Было показано, что многие экзополисахариды из микроводорослей и цианобактерий проявляют антиоксидантную активность в отношении супероксидных, гидроксильных и гидроксилпероксильных радикалов. Помимо биологической активности особый интерес вызывает использование полисахаридов микроводорослей в качестве биостимуляторов растений.

Таким образом, экзополисахариды фототрофных микроорганизмов могут найти применение в пищевой, косметической, фармацевтической и сельскохозяйственной областях.

Липиды и жирные кислоты. Среди разнообразия липидов, синтезируемых фототрофными микроорганизмами, можно выделить две основные группы: так называемые запасные (главным образом триацилглицерина (триглицериды)), которые образуются в результате процессов фотосинтеза и хранятся в клетке в виде липидных капель (телец), и структурные липиды (фосфолипиды и стеролы), являющиеся неотъемлемой частью клеточной структуры.

В состав липидов входят жирные кислоты, особый интерес среди которых представляют полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК). Состав и содержание липидов варьируются от вида к виду, тогда как общий состав (профиль) жирных кислот фототрофных микроорганизмов сохраняется в пределах одного типа. Тем не менее содержание индивидуальных жирных кислот сильно варьируется в зависимости от факторов окружающей среды. Фототрофные микроорганизмы синтезируют α - и γ -линолевую кислоты, арахидоновую, эйкозапентаеновую, докозагексаеновую кислоты с привлекательными свойствами как для пищевой, так и для фармацевтической промышленности. Доказан положительный эффект ПНЖК при профилактике и лечении различных заболеваний.

Пигменты. Фототрофные микроорганизмы синтезируют три типа пигментов: хлорофиллы, каротиноиды и фикобилипротеины. В результате многочисленных исследований было установле-

но, что данные пигменты обладают целым спектром биологической активности, что нашло широкое применение в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности.

Так, ввиду своего яркого естественного цвета пигменты часто используются в качестве натуральных красителей для придания требуемого оттенка различным косметическим и пищевым продуктам (хлорофиллы – зеленый, каротиноиды – желтый, оранжевый, красный, фикоцианобилин – от бледно-голубого до насыщенного синего цвета). Кроме того, пигменты обладают антиоксидантной активностью и фотозащитными свойствами, что позволяет использовать их и в качестве активных компонентов косметических продуктов и пищевых добавок.

Витамины. Фототрофные микроорганизмы синтезируют большинство известных на сегодня витаминов: провитамин А, витамины группы В (V_1 , V_2 , V_3 , V_5 , V_6 , V_9 и V_{12}), витамины С и К. Накопление витаминов в клетке зависит от индивидуальных особенностей организма, условий культивирования, состава питательных сред, а также от фазы роста.

Вторичные метаболиты, такие как полифенолы (фенольные кислоты, флавоноиды, изофлавоноиды, стильбены, лигнаны и фенольные полимеры) и стерины, также проявляют широкий спектр биологической активности, включая антиоксидантную активность, противовоспалительные, противораковые, противоаллергические, антидиабетические, антивозрастные и противомикробные свойства. Однако необходимы дальнейшие исследования по изучению механизма сверхсинтеза данных соединений, а также разработке методов их выделения и очистки.

Следует упомянуть полигидроксиалконаты, образующиеся в результате многочисленных превращений усвоенных источников углерода в гидроксиданканоатные мономерные звенья, которые полимеризуются и образуют в цитоплазме клеток не растворимые в воде включения (или гранулы). Полигидроксиалконат представляет собой кристаллический термопласт со свойствами, сравнимыми со свойствами полипропилена, и поэтому рассматривается в качестве потенциального заменителя небiorазлагаемых нефтехимических пластмасс. Доказано, что полигидроксиалконаты являются полностью биоразлагаемыми (под действием встречающихся в природе микроорганизмов) и биосовместимыми – их применение в биомедицинских и биофармацевтических областях в настоящее время активно изучается [62].

Таким образом, несмотря на широкое разнообразие веществ с высокой добавленной стоимостью, синтезируемых фототрофными микроорганизмами, потенциальные области применения данных биологически активных соединений от-

Таблица 2. Коммерчески значимые соединения, синтезируемые фототрофными микроорганизмами [59, 61, 63]

| Основные компоненты | Организм-продуцент | Биологический эффект |
|-------------------------------|---|---|
| Пигменты | | |
| Каротиноиды | | |
| β-каротин | <i>Dunaliella salina</i> <i>Chlorella zofingiensis</i> <i>Spirulina maxima</i> | – являются предшественниками витаминов; – обладают антиоксидантной активностью; – проявляют противовоспалительные, антигипертензивные, нейропротекторные свойства; |
| Астаксантин | <i>Haematococcus pluvialis</i> <i>Chlorella zofingiensis</i> | – доказан положительный эффект против рака, атеросклероза, язв и сердечно-сосудистых заболеваний, |
| Фукоксантин | <i>Cyclotella cf. cryptica</i> <i>Cylindrotheca closterium</i> <i>Mallomonas sp.</i> <i>Phaeodactylum tricornutum</i> | – для предотвращения дегенерации желтого пятна, снижения распространенности метаболического синдрома, ожирения и концентрации триглицеридов в сыворотке; |
| Лютеин | <i>Auxenochlorella protothecoides</i> <i>Chlorella protothecoides</i> <i>Chlorella pyrenoidosa</i> <i>Chlorella sorokiniana</i> <i>Coelastrella sp.</i> <i>Galdieria sulphuraria</i> <i>Parachlorella kessleri</i> <i>Scenedesmus almeriensis</i> <i>Scenedesmus bijugus</i> <i>Vischeria stellata</i> | – являются иммунными активаторами, укрепляют иммунитет к вирусным, бактериальным, грибковым и паразитарным инфекциям |
| Зеаксантин | <i>Porphyridium cruentum</i> <i>Pavlova lutheri</i> <i>Pavlova salina</i> <i>Pavlova sp.</i> <i>Amphiprora hyaline</i> | |
| Хлорофиллы | | |
| Хлорофилл <i>a</i> и <i>b</i> | <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Arthrospira platensis</i> | – обладают антиоксидантной активностью и противовоспалительными свойствами; – выступают в качестве иммунных активаторов; – доказана цитотоксичность по отношению к опухолевым клеткам; – используются при профилактике рака, для стимуляции функций печени, увеличения секреции желчи, увеличения содержания гемоглобина; – содействуют быстрому росту клеток |
| Фикобилопротеины | | |
| Фикоцианин | <i>Arthrospira platensis</i> | – обладают антиоксидантными свойствами; |
| Фикоэритрин | <i>Porphyridium cruentum</i> | – используются как флуоресцентные метки в иммунологических методах; – доказан противораковый, противовоспалительный эффект; – ранозаживляющее действие; – нейро- и гепатопротекторные свойства |

Таблица 2. Окончание

| Основные компоненты | Организм-продуцент | Биологический эффект |
|---|--|--|
| Липиды и жирные кислоты | | |
| α -линоленовая кислота (α -C _{18:3}) | <i>Chlorella</i> | – положительное воздействие на кровеносную систему (давление, коагуляция), на функционирование и развитие нервной и зрительной систем; |
| γ -линоленовая кислота (γ -C _{18:3}) | <i>Arthrospira platensis</i> | – снижение риска возникновения хронических заболеваний (диабет, артрит, сердечно-сосудистые заболевания и ожирение); понижение уровня холестерина; |
| Эйкозапентаеновая кислота (C _{20:0}) | <i>Phaeodactylum sp.</i> <i>Chlorella sp.</i> <i>Monodus sp.</i> | – противовоспалительные свойства; |
| Докозагексаеновая кислота (C _{22:6}) | <i>Cryptocodinium</i> <i>Thraustochytrium</i> <i>Schizochytrium</i> | – предотвращение ряда заболеваний (артрит, болезнь Альцгеймера, псориаз и некоторые виды рака) |
| Белки и аминокислоты | <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Scenedesmus obliquus</i> <i>Nannochloropsis sp.</i> <i>Chlorella sachharophila</i> <i>Porphyridium aerugineum</i> <i>Botryococcus braunii</i> <i>Tetraselmis chuii</i> <i>Nannochloropsis granulate</i> | – обладают противовоспалительными, антигипертензивными, противораковыми, антибактериальными и антиоксидантными свойствами; |
| Экзополисахариды | <i>Botryococcus braunii</i> <i>Chlamydomonas</i> <i>Chlorella sp.</i> <i>Flintiella anguinaria</i> <i>Porphyridium</i> <i>Rhodella</i> <i>Tetraselmis gracilis</i> <i>Corynoplatis japonica</i> <i>Neorhodella cyanea</i> <i>Erythrolobus coxiae</i> <i>Anabaena sp.</i> <i>Anacystis nidulans</i> <i>Nostoc calcicola</i> <i>Spirulina sp.</i> | – стимулируют синтез коллагена, уменьшают сосудистые дефекты; |
| | | – обладают фотозащитными свойствами. |
| | | – обладают антиоксидантной активностью, – проявляют противовирусное (ВИЧ, простой герпес типа 1), противоопухолевое, антикоагулянтное, антилипидемическое, противовоспалительное действие; |
| | | – являются иммуноактиватором, возможно использование в качестве гелеобразующего компонента при создании лекарств |

носятся главным образом к пищевой, косметической, сельскохозяйственной и фармацевтической промышленности.

Основные биологически активные соединения, получаемые из биомассы фототрофных микроорганизмов и представляющие коммерческий интерес, а также области их применения в фармацевтике приведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы 63 научные публикации по тематикам, связанным с использова-

нием технологий на основе фототрофных микроорганизмов для городских нужд. Выбирались публикации, непосредственно связанные с технологиями фототрофных микроорганизмов, а также отражающие современные подходы к городскому планированию, интернету вещей и экотехнологиям. Все публикации относятся к категории высокорейтинговых, т.е. опубликованы в ведущих журналах в своих областях либо являются докладами на ключевых профильных конференциях.

Технологии на основе фототрофных микроорганизмов имеют высокий потенциал актуально-

сти и востребованности при переходе городов к углеродной нейтральности. Высокая скорость фиксации углекислого газа, очистка и повторное использование поверхностных сточных вод, а также широкий спектр получаемых продуктов делают фототрофные микроорганизмы самым перспективным кандидатом при разработке городских биотехнологий. Уже накоплено достаточно данных, чтобы утверждать о том, что фотобиореакторы могут стать неотъемлемой частью городов будущего, кардинально меняя экологическую ситуацию, качество воздуха и тем самым повышая качество жизни населения. Широкое внедрение фотобиореакторов в комбинации с развитым городским озеленением позволит в перспективе сделать города крупными поглотителями углекислого газа. Немаловажным является и то, что внедрение таких технологий позволит создавать в городских агломерациях новые рабочие места в наиболее передовой и высокотехнологичной отрасли.

Работа выполнена в рамках государственного задания “НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демографические изменения. United Nations, 2022. <https://www.un.org/ru/un75/shifting-demographics> (accessed August 19, 2022).
2. *Barnett J.* City design: Modernist, traditional, green and systems perspectives: Second edition. New York: Taylor and Francis Inc., 2016. <https://doi.org/10.4324/9781315707983>
3. *Juhola S.* // Urban Forestry Urban Green. 2018. V. 34. P. 254. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.019>
4. *Brito V.T.F., Ferreira F.A.F., Pérez-Gladish B. et al.* // J. Clean. Prod. 2019. V. 218. P. 486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.060>
5. *Graells-Garrido E., Serra-Burriel F., Rowe F. et al.* // PLoS One. 2021. V. 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250080>
6. *Pinto F., Akhavan M.* // Transp. Res. Procedia. 2022. V. 60. P. 370. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2021.12.048>
7. *Gordon P., Kumar A., Richardson H.W. et al.* // J. Urban Econ. 1989. V. 26. P. 138. [https://doi.org/10.1016/0094-1190\(89\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0094-1190(89)90013-2)
8. *Talaei M., Mahdavinjad M., Azari R. et al.* // Energy Technologies and Assessments. 2022. V. 52. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2021.101894>
9. *Kraakman N.J.R., González-Martín J., Pérez C. et al.* // Rev. Environ. Sci. Bio/Technology. 2021. V. 20. P. 363. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09569-x>
10. *Gotovtsev P.* // Appl. Sci. 2020. V. 10. <https://doi.org/10.3390/AP10113990>
11. *Pruvost J., Le Gouic B., Lepine O. et al.* // Chem. Eng. J. 2016. V. 284. P. 850. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.118>
12. *Öncel S.Ş., Köse A., Öncel D.Ş. et al.* // Start-Up Creation. 2016. P. 237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100546-0.00011-X>
13. *En Tham P., Jer Ng Y., Vadivelu N. et al.* // Bioresour. Technol. 2021. V. 346. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126558>
14. *Berndtsson J.* // Ecological Engineering. 2010. V. 36. P. 351. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
15. *Shafique M., Kim R., Rafiq M. et al.* // Renew. Sustain. Energy Rev. 2018. V. P. 757. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
16. *Al-Chalabi M.* // Sustain. Cities Soc. 2015. V. 18. P. 74. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.003>
17. *Puri M., Gupta A., McKinnon R.A. et al.* // Trends Biotechnol. 2021. V. 40. P. 271. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.08.004>
18. *Azam R., Kothari R., Singh H.M. et al.* // J. Biotechnol. 2022. V. 344. P. 24. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTEC.2021.11.006>
19. *Wollmann F., Dietze S., Ackermann J.-U. et al.* // Eng. Life Sci. 2019. V. 19. P. 860. <https://doi.org/10.1002/ELSC.201900071>
20. *Wolf J., Stephens E., Steinbusch S. et al.* // Algal Res. 2016. V. 15. P. 187. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.02.018>
21. *Inam A., Once S.S.* // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2021. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03281-7>
22. *Gorin K.V., Sergeeva Y.E., Butylin V.V.* // Bioresour. Technol. 2015. V. 193. P. 178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.097>
23. *Gorin K., Kolomoitsev D., Melnikova A. et al.* // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/337/1/012001>
24. *Salgueiro J.L., Pérez L., Maceiras R. et al.* // Int. J. Environ. Res. 2018. V. 12. P. 765. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0129-4>
25. *Abdel-Raouf N., Al-Homaidan A.A., Ibraheem I.B.M. et al.* // Saudi J. Biol. Sci. 2012. V. 19. № 3. P. 257. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
26. *Vasilieva S., Lobakova E., Grigoriev T. et al.* // J. Water Process Eng. 2021. V. 40. P. 101774. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101774>
27. *Gorin K.V., Sergeeva Y.E., Pojidaev V.M. et al.* // Results Engineering. 2019. V. 4. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100041>
28. *Gorin K., Pojidaev V., Borgolov A. et al.* // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/337/1/012006>
29. *Suresh Kumar K., Dahms H.-U., Won E.-J. et al.* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015. V. 113. P. 329. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>
30. *Li L., Bergen J.M.* // Cities. 2018. V. 74. P. 126. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.11.013>
31. *Wanjiru E., Xia X.* // Sustain. Cities Soc. 2017. V. 32. P. 654. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.009>
32. *Campisano A., Butler D., Ward S.* // Water Res. 2017. V. 115. P. 195. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>

33. *Lockwood D.* // ACS Central Sci. 2019. V. 5. P. 376.
<https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b00191>
34. *Gotovtsev P.M., Komova A.V., Gorin K.V. et al.* // Energy Technol. Assessments. 2019. V. 31. P. 132.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.021>
35. *Minas K., Karunakaran E., Bond T. et al.* // Desalination Water Treatment. 2015. V. 55. № 10. P. 2647.
<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.940647>
36. *Yao Z., Ying C., Lu J. et al.* // Chin. J. Oceanol. Limnol. 2013. V. 31. P. 1248.
<https://doi.org/10.1007/s00343-013-2116-0>
37. *Venkata Mohan S., Srikanth S., Chiranjeevi P. et al.* // Bioresour. Technol. 2014. V. 166. P. 566.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.081>
38. *Angioni E.Q.S., Millia L., Mustarelli P. et al.* // Heliyon. 2018. V. 4. № 3. e00560.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00560>
39. *Greenman J., Gajda I., Ieropoulos I. et al.* // Energy Fuels. 2019. V. 3. P. 2546.
<https://doi.org/10.1039/C9SE00354A>
40. *Tarasov S., Plekhanova Y., Kashin V. et al.* // Biosensors. 2022. V. 12. P. 699.
<https://doi.org/10.3390/BIOS12090699>
41. *Vishnevskaya M., Gazizova D.* // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/337/1/012002>
42. *Talae M., Mahdaveinejad M.* // Eng. Failure Anal. 2019. V. 101. P. 9–21
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.060>
43. *Scherer K., Stiefelmaier J., Strieth D. et al.* // J. Biotechnol. 2020. V. 320. P. 28.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.06.004>
44. *Silva B.N., Khan M., Han K. et al.* // Sustain. Cities Soc. 2018. V. 38. P. 697.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.053>
45. *Jin J., Gubbi J., Marusic S. et al.* // IEEE Internet Things J. 2014. V. 1. № 2. P.112–121.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2013.2296516>
46. *Zanella A., Bui N., Castellani A. et al.* // IEEE Internet Things J. 2014. V. 1. №1 P. 22–32.
<https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
47. *Rathore M.M., Ahmad A., Paul A. et al.* // Computer Networks. 2015. V. 101. P. 63–80.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.023>
48. *Zhu C., Zhou H., Leung V.C.M. et al.* // IEEE Commun. Mag. 2017. V. 55. № 11. P. 14.
<https://doi.org/10.1109/mcom.2017.1700142>
49. *Gotovtsev P.M., Dyakov A.V.* // 2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT). 2016. P. 542.
<https://doi.org/10.1109/wf-iot.2016.7845476>
50. *Yong S., Yong G., Sukačová K. et al.* // Biotechnol. Adv. 2020. V. 44. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107631>
51. *Khargonekar P.P., Dahleh M.A.* // Rev. Control. 2018. V. 45. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.04.001>
52. *Samek W., Montavon G., Lapuschkin S. et al.* // Proc. IEEE. 2021. V. 109. P. 247.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3060483>
53. *Hu D., Liu H., Yang C. et al.* // Acta Astronaut. 2008. V. 63. P. 1067.
<https://doi.org/10.1016/J.ACTAASTRO.2008.02.008>
54. *Supriyanto R., Noguchi T., Ahamed* // Biotechnol. Adv. 2019. V. 177. P. 122.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107545>
55. *Sharon Mano Pappu J., Vijayakumar G.K., Ramamurthy V.* // Bioresour. Technol. 2013. V. 130. P. 224.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.082>
56. *Rio-Chanona E.A., Manirafasha E., Zhang D. et al.* // Algal Res. 2016. V. 13. P. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.11.004>
57. *Gotovtsev P.M., Konova I.A.* // Int. Conf. Sens. Instrum. IoT Era, IEEE. 2019. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ISSI47111.2019.9043737>
58. *Oliveira S.M.D., Densmore D.* // BioDesign Res. 2022. P. 1.
<https://doi.org/10.34133/2022/9794510>
59. *Levasseur W., Perré P., Pozzobon V.* // Biotechnol. Adv. 2020. V. 41.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107545>
60. *Khanra S., Mondal M., Halder G.* // Food Bioprod. Process. 2018. V. 110. P. 60.
<https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.02.002>
61. *Laroche C.* // Drugs. 2022. V. 20. P. 336.
<https://doi.org/10.3390/MD20050336>
62. *Costa S.S., Miranda A.L., de Morais M.G.* // Int. J. Biol. Macromol. 2019. V. 131. P. 536.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.099>
63. *Mehariya S., Goswami R.K., Karthikeyan O.P. et al.* // Chemosphere. 2021. V. 280. P. 130553.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130553>