

Передовые разработки для биоэкономики: кейс продукции из микроводорослей

Ирина Адарченко¹

Аспирант, adarchenok@yandex.ru

Анна Курбатова¹

Доцент, kurbatova-ai@rudn.ru

Наталья Поротникова²

Доцент, заместитель директора, porotnikova@hse.ru

Елена Савенкова¹

Профессор, savenkova-ev@rudn.ru

Винод Кумар^{1,3}

Научный сотрудник, vinodkhatwalia@gmail.com

Яна Скороходова¹

Студент бакалавриата, 1032216649@pfur.ru

¹ Российский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198

² Институт экологии НИУ ВШЭ, ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000

³ Департамент наук о жизни, Университет «Graphic Era» (Department of Life Sciences, Graphic Era Deemed University), Dehradun, Uttarakhand 248002, India

Аннотация

В статье представлен подробный анализ мирового рынка микроводорослей, включая научно-технологические возможности и перспективы их промышленного выращивания и создания производной продукции. Системно оцениваются коммерческий потенциал микроводорослей в разных регионах мира, наиболее перспективные штаммы, типы продуктов и потенциальные сферы их применения, а также траектория дальнейшего развития рынка. Научно-технологический интерес к теме проанализирован на базе ежегодной динамики числа статей, которые содержат ключевое слово «микроводоросли» и опубликованы в журналах, индексируемых Scopus. Результаты представлены в хронологическом, категориальном и региональном измерениях, что дает многомерную картину эволюции внимания ученых во времени и в разных географических контекстах. Коммерческий потенциал детально проанализирован на региональном уровне с акцентом на ключевые

центры разработки микроводорослевой продукции: США, Германию, Китай и Японию. В ходе исследования учитывалась преобладающая динамика рынка в каждом регионе, что позволило комплексно оценить конъюнктуру.

К значимым результатам исследования относятся подробно описанные перспективы развития рынка микроводорослей, новый обоснованный подход, обогащающий существующие представления об этом рынке. Его сегментация по сферам применения продукции, включая производство нутрицевтиков и фармацевтических препаратов, еды и напитков, косметики, кормов для животных и биотоплива, позволила выявить направления устойчивого роста. Среднегодовые темпы роста мирового рынка микроводорослей прогнозируются на уровне 6.8%, к 2030 г. объем этого рынка достигнет 2 млрд долл., что свидетельствует о высоком потенциале производных продуктов в различных отраслях и о важности развития биоэкономики в целом.

Ключевые слова: микроводоросли; рыночный прогноз; биоэкономика; мировой рынок; биомедицина; биотехнологии; нутрицевтики; биотопливо

Цитирование: Adarchenko I., Kurbatova A., Porotnikova N., Savenkova E., Kumar V., Skorokhodova Y. (2024) Advanced Technologies for Bioeconomy. The Case of Microalgae Production. *Foresight and STI Governance*, 18(2), pp. 69–83. DOI: 10.17323/2500-2597.2024.2.69.83

Advanced Technologies for Bioeconomy: The Case of Microalgae Production

Irina Adarchenko¹

PhD Student, adarchenok@yandex.ru

Anna Kurbatova¹

Associate Professor, kurbatova-ai@rudn.ru

Natalia Porotnikova²

Associate Professor, Deputy Director, porotnikova@hse.ru

Elena Savenkova¹

Professor, savenkova-ev@rudn.ru

Vinod Kumar^{1,3}

Researcher, vinodkdhatwalia@gmail.com

Yana Skorokhodova¹

Bachelor Student, 1032216649@pfur.ru

¹ RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

² Institute of Ecology NRU HSE, 20 Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russian Federation

³ Department of Life Sciences, Graphic Era (Deemed To Be University), Dehradun, Uttarakhand 248002, India

Abstract

This article presents a meticulous examination of the global microalgae market, analyzing opportunities and prospects rooted in the scientific and technical interest in products derived from microalgae. The research systematically assesses the potential commercialization of these products across diverse regions worldwide, identifies the most promising microalgae strains, the product types themselves, and their potential applications. An integral aspect of this research involves a forward-looking market forecast. The analysis of scientific and technical interest delves into publication activity, considering the yearly output of works in Scopus-indexed journals utilizing the main keyword “microalgae”. This assessment is presented chronologically, categorically, and regionally, offering a nuanced perspective on the evolution of interest over time and in different geographical contexts. The commercialization potential is regionally scrutinized with a focus on key regions conducive to the development of microalgae-based products,

namely the Americas (USA), Asia-Pacific (China, Japan), and Europe (Germany). This evaluation is interlinked with the prevailing market dynamics in each region, providing a holistic understanding of the market landscape.

This article contributes original insights derived from the analysis, offering a nuanced perspective on the microalgae market. It introduces a distinctive and informed viewpoint, enriching existing knowledge of microalgae markets. By categorizing the microalgae market based on applications, including nutraceuticals and pharmaceuticals, food and beverages, cosmetics, animal feed, and biofuels, the study identifies sectors exhibiting steady growth. Notably, each of these sectors contributes to the projected average annual growth rate of 6.8 % on the global microalgae market, forecasted to reach USD 2 billion by 2030. This growth trajectory emphasizes the growing importance and potential of microalgae-derived products in various industries and the importance of developing the bioeconomy as a whole.

Keywords: microalgae; market forecast; spirulina; chlorella; bioeconomy; global market; biomedicine; biotechnology; nutraceuticals; biofuel

Citation: Adarchenko I., Kurbatova A., Porotnikova N., Savenkova E., Kumar V., Skorokhodova Y. (2024) Advanced Technologies for Bioeconomy. The Case of Microalgae Production. *Foresight and STI Governance*, 18(2), pp. 69–83. DOI: 10.17323/2500-2597.2024.2.69.83

Глобальный рост численности населения в сочетании с бурным экономическим развитием и урбанизацией способствуют повышению спроса на продовольствие и энергетические ресурсы, что оказывает негативное влияние на окружающую среду (Ramanauskė et al., 2023). К актуальным примерам таких последствий относятся истощение энергетических и водных ресурсов, увеличение объемов эмиссии CO₂ и загрязнение водоемов (Moreira et al., 2023).

Одним из инструментов противодействия указанным тенденциям служит концепция экономики замкнутого цикла, уже реализуемая в развитых странах, прежде всего в модели биоэкономики — инновационных технологий использования устойчивых возобновляемых биологических ресурсов. Она предлагает ответ на такие важные экономические и экологические вызовы, как истощение природных богатств, сверхпотребление невозобновляемых ресурсов и изменение климата, а также обеспечение продовольственной безопасности (Wydra, 2021; Machado Sierra et al., 2021; Ramírez et al., 2020; Parveen et al., 2023). Благодаря стимулированию глобального перехода к ресурсоэффективной и низкоуглеродной экономике (Kurran et al., 2023; Parveen et al., 2023) биоэкономика может стать крупной новой отраслью, вытеснив ряд других (Befort, 2020; Fernandez et al., 2021).

Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) определяет биоэкономику как «основанное на знаниях производство и использование биологических ресурсов, биологических процессов и принципов устойчивого предоставления товаров и услуг во всех секторах экономики»¹. В последние годы этот термин из сугубо научного обихода (Bugge et al., 2016) перешел в область принятия государственных решений (Pahun et al., 2018). По мнению Еврокомиссии, биоэкономический подход обеспечит как экологические, так и социально-экономические выгоды. Решения о применении биомассы в значительной мере определяют параметры будущей биоэкономики в терминах устойчивости (Asada et al., 2020). Вместе с тем, сам транзит может происходить по-разному, и ни одна из его траекторий не является прямой (Bauer, 2018).

Биоэкономику можно определить как хозяйственный принцип, при котором «материалы, химикаты и энергия производятся в основном из возобновляемых биологических ресурсов» (McCormick, Kautto, 2013). Замена синтетических продуктов на биомассу несет положительный эффект для окружающей среды и здоровья людей. В работе (Ahmad et al., 2021) описывается интеграция водорослей в производство биотоплива и других продуктов на биоперерабатывающих заводах, что позволит снизить выбросы CO₂ на 80%. Микроводоросли (микрофиты) — одноклеточные микроскопические организмы-эукариоты, которые способны преобразовывать солнечную энергию в химическую посредством фотосинтеза, производят примерно

половину кислорода в атмосфере Земли и перерабатывают углекислый газ для фотоавтотрофного роста. Будучи начальным звеном пищевой цепи, микроводоросли обеспечивают энергией все трофические уровни (Ponnuvel et al., 2023; Masojídek et al., 2023; Parveen et al., 2023; Chunzhuk et al., 2023).

Высокая энергетическая ценность и скорость роста микроводорослей заинтересовали разработчиков технологий производства биотоплива (Hossain et al., 2019). Топливо из микроводорослей является экологически чистым и обладает значительным потенциалом извлечения CO₂ из атмосферы (Onyeaka et al., 2021). Микроводоросли выступают хорошей альтернативой многим промышленным продуктам и материалам и позволяют существенно снизить ущерб окружающей среде. Так, упаковка, изготовленная из различных природных ресурсов, в частности биомассы, микроорганизмов или водорослей, обладает улучшенными физическими характеристиками (Kumar et al., 2022).

Микроводоросли — один из лучших видов сырья для производства биополимеров, чьи характеристики превосходят синтетические полимеры, изготовленные из нефти, благодаря улучшенным механическим свойствам. Их использование способствует переходу к биоэкономике замкнутого цикла в глобальном масштабе (Das et al., 2021). Как отмечено в работах (Khan et al., 2018; Fernandez et al., 2021), микроводоросли выступают ценным источником соединений углерода, углеводов (например, крахмала и глюкозы), белков, клетчатки, эссенциальных кислот, витаминов (B1, B2, B5, B6, B9, A, C и E), которые можно применять в производстве косметики, фармацевтических препаратов и пищевых добавок. При употреблении в пищу микроводоросли обеспечивают профилактику различных заболеваний, а содержащаяся в них эйкозапентаеновая кислота стимулирует развитие мозга у младенцев. В контексте глобального роста населения микроводоросли могут стать удобной альтернативой продуктов животного и растительного происхождения (Barkia et al., 2019; Garrido-Cardenas et al., 2018).

В медицинских и фармакологических исследованиях отмечается высокая эффективность микроводорослей как средства предотвращения и лечения многих заболеваний иммунной, эндокринной, пищеварительной, сердечно-сосудистой и нервной систем человека и животных. Так, *Spirulina Platensis* и ее экстракт способны снижать риск возникновения рака, уровень холестерина в крови и защищать от вредного воздействия радиации (Abeer et al., 2015). Водоросли могут также использоваться для биосинтеза ряда соединений. Так, спирулина позволяет синтезировать йодсодержащие соединения гормональной природы, в частности тироксин и трийодтиронин, которые легко усваиваются организмом человека (Enzing et al., 2014). В фармацевтической промышленности микроводоросли широко применяются в производстве оболочек капсул, диагностических средств, витаминов, антибиотиков, полиненасыщенных

¹ <https://www.fao.org/in-action/sustainable-and-circular-bioeconomy/overview/en/>, дата обращения 17.05.2024.

Рис. 1. Направления использования продуктов из микроводорослей



жирных кислот и антибактериальных препаратов. Они могут продуцировать токсины, блокирующие рост бактерий (Abu Zaid et al., 2015; Fernandez et al., 2021).

Благодаря высокому содержанию масел, пигментов и антиоксидантов существует широкий спектр направлений коммерческого применения водорослей в косметологии (Kuldipsinh et al., 2023). В расчете на гектар из микроводорослей можно получать в 15–100 раз больше масла, чем из любых других растений, а ввиду незначительного содержания лигнина они проще и эффективнее в переработке (Maltsev et al., 2017).

В литературе отмечается потенциальная ценность микроводорослей для развития новых отраслей, таких как производство биоматериалов, сельскохозяйственной продукции, биотоплива и некоторых услуг, в частности очистки сточных вод и промышленных газов (Fernandez et al., 2021). В мировом агросекторе активно внедряются ресурсосберегающие технологии разведения и откармливания животных (Fernandez et al., 2021). Корма, обогащенные микроводорослевой биомассой, положительно влияют на физиологию животных, повышают их иммунитет, репродуктивную способность и привес (Remize et al., 2021), а также решают проблему несбалансированного рациона (Navarro et al., 2016). На фермах в США обустривают пруды с водорослями для утилизации отходов животноводства (Makarova et al., 2009). Кроме того, микроводоросли служат важным биоиндикатором состояния окружающей среды (O'Neill, Rowan, 2022; Cid et al., 2013).

Основные направления применения микроводорослей обобщены на рис. 1.

В контексте современных биотехнологий микроводоросли вызывают большой интерес как биовозобновляемый ресурс для экономически эффективного производства энергии с высокой добавленной стоимостью (Singh et al., 2022). Как уже отмечалось, они широко применяются в производстве биотоплива, благодаря быстрому росту, значительно опережающему традиционные растительные культуры (Priya et al., 2022), произрастанию на непригодных для растениеводства

территориях, безотходности, экологичности, энерго- и ресурсоемкости производимой энергии. В терминах биомассы и концентрации липидов урожайность микроводорослей в десятки раз превышает наземные растения (Vlaskin et al., 2018). Как источник биоэнергии микроводоросли отличаются высокой эффективностью при минимальных экологических издержках (Zhang et al., 2022): их выращивание не требует почвы, пресной воды (пригодны соленые и даже сточные воды), пестицидов и удобрений (Khan et al., 2018).

Содержащиеся в микроводорослях высокопродуктивные липиды находят применение в производстве газообразных (водород и биогаз) и жидких (этанол) топлив, а также жидкого углеводородного топлива (Sanghamitra et al., 2021). Тем самым микроводоросли обладают огромным потенциалом как недорогое и энергоэффективное сырье для производства биотоплива. В соответствии с современной классификацией полученное таким способом топливо относится к биотопливу третьего поколения (Chernova et al., 2012). На текущем этапе развития энергетика на основе биомассы микроводорослей включает производство биодизеля из липидов путем переэтерификации (Vignesh et al., 2021), получение метана методом анаэробного сбраживания (Qi et al., 2017) и производство углеводородов из сырой нефти и аналогичных веществ путем газификации и пиролиза.

Несмотря на отмеченные преимущества биотоплива из микроводорослей, ученым пока не удалось разработать технологии их производства по конкурентоспособной цене. На высокие (в сравнении с традиционными видами сырья) затраты как сдерживающий фактор крупномасштабного производства биоэнергоресурсов третьего поколения указывают авторы работы (Пилигаев и др., 2014); низкая экономическая эффективность в данном случае обусловлена отсутствием оптимальных методов выращивания микроводорослей (Стребков и др., 2012).

Интерес к производству биотоплива в последнее десятилетие объясняется рядом факторов. Помимо снижения выбросов CO_2 , он обусловлен глобальным ростом спроса на углеводородное сырье, запасы которого продолжают истощаться: специалисты отмечают, что при современном уровне потребления запасов нефти хватит не более чем на 40 лет, а природного газа — на 60 лет (Воробьев и др., 2015).

Микроводоросли открывают практически безграничные возможности для развития современной биоэкономики, учитывая их метаболическую гибкость и высокий уровень выхода биомассы даже при выращивании в неблагоприятных условиях, что позволяет использовать их для очистки сточных вод или утилизации топочных газов (Fernandez et al., 2021). Микроводоросли могут сыграть критически важную роль в решении экологических проблем благодаря эффективному улавливанию CO_2 и потенциальному достижению углеродной нейтральности (Mendonça et al., 2024). В свою очередь, биоэкономика замкнутого цикла обеспечит оптимальное применение их биомассы для формирования чистой и устойчивой экономической системы (Ahmad et al., 2021).

Учитывая широкий спектр сфер применения микроводорослей, анализ рынка производной продукции имеет важное научное, экономическое и практическое значение.

Цель исследования

Цель исследования состоит в детальном анализе мирового рынка микроводорослей для комплексной оценки научно-технологических возможностей и перспектив их промышленного выращивания и создания производной продукции. В частности, системно оценивается коммерческий потенциал микроводорослей в разных регионах мира путем выявления наиболее перспективных штаммов, классификации типов продуктов и анализа их применения.

Основными задачами исследования были определены следующие:

1. *Научно-технологическая оценка:* исследовательский интерес к микроводорослям был тщательно проанализирован на материале профильных публикаций в журналах, индексируемых Scopus. Оценка выполнялась в хронологическом, категориальном и региональном разрезе, чтобы глубже понять динамику изучения микроводорослей.

2. *Коммерческий потенциал:* оценка перспектив коммерциализации продуктов на основе микроводорослей с акцентом на ключевых для развития данного направления странах (США, Германия, Китай и Япония) и с учетом их рыночной конъюнктуры.

3. *Прогноз рыночной динамики:* интегральным элементом исследования выступает характеристика ожидаемой траектории роста мирового рынка микроводорослей. При подготовке прогноза будущих размеров и оборота рынка учитывались такие факторы, как предыдущие тенденции, текущая динамика и выявленный коммерческий потенциал.

Ценность исследования

Проведенный анализ значительно расширяет имеющиеся знания о продуктах и услугах на основе микроводорослей. По результатам углубленного поиска и изучения литературы и других имеющихся материалов представлен комплексный обзор современного состояния исследований и отраслевых тенденций в сфере применения микроводорослей. Практическую значимость работе придает региональный разрез в оценке коммерческого потенциала производной продукции с акцентом на ключевых странах.

Проекция полученных результатов на текущую динамику рынка микроводорослей не только сулит многообещающие возможности, но и позволяет извлечь практические идеи и рекомендации для игроков. Тем самым настоящее исследование может служить важным источником информации для ученых, отраслевых специалистов и политиков, желающих углубиться в рассматриваемую проблематику. Выдвинутые прогнозы темпов роста рынка микроводорослей позволяют сформировать представление о его дальнейшем развитии, используя полученные результаты как актуальный информационный ресурс о производной продукции и услугах.

Методология

Использованная методология включала поиск и обзор литературы о микроводорослях и комплексный анализ имеющихся источников о производной продукции и услугах. В основу исследования лег детальный анализ научных публикаций, отраслевых отчетов и других актуальных материалов для оценки глубины и охвата имеющихся в данной области знаний и идей и степени их практической реализации. Благодаря этому получено контекстное представление об эволюции интереса к продуктам из микроводорослей и о тенденциях в данной сфере.

Ключевым элементом замера научно-технологического интереса к упомянутой проблематике стал системный анализ журналов базы данных Scopus на предмет публикаций, содержащих ключевое слово «микроводоросли». Одновременное применение хронологической, категориальной и региональной оптик позволило получить многомерное представление о состоянии исследований и разработок (ИиР) в рассматриваемой области.

Коммерческий потенциал микроводорослей оценивался посредством регионального подхода с фокусом на страны, представляющие наиболее передовые в развитии данного направления регионы — Северную Америку, Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР) и Европу. Такой подход обеспечил объемную картину глобального рынка производной продукции.

Анализ рынка

Оценка научно-технологического интереса к теме дает комплексное понимание тенденций развития рынка микроводорослей. Системный анализ журналов, индексируемых в международной базе Scopus, показывает, что за период с 1974 по 2022 г. в мире были опубликованы 20 472 материала, содержащих ключевое слово «микроводоросли». Динамика таких публикаций представлена на рис. 2.

В 2000–2022 гг. больше всего исследований по теме было опубликовано авторами из Китая (6265), США

Рис. 2. Динамика научных публикаций об исследованиях микроводорослей в журналах, индексируемых Scopus



Рис. 3. Динамика научных публикаций об исследованиях микроводорослей в журналах, индексируемых Scopus, по странам и территориям



(4231) и Индии (3120) (рис. 3а, 3б). Отечественные авторы, аффилированные с российскими организациями, опубликовали 820 статей (17-е место в рейтинге стран). Значительная часть исследований о микроводорослях в этот период была выпущена в экологических журналах — 12 222 статьи, на втором месте по частоте обращения к теме находятся издания по сельскохозяйственным и биологическим наукам (11 741), за ними следуют специализированные журналы по химическому машиностроению (8101), биохимии, генетике и молекулярной биологии (7225) и энергетике (6858). В первом десятилетии XXI в. (2000–2009 гг.) основная часть профильных работ публиковалась в журналах по сельскохозяйственным и биологическим наукам. В 2010–2019 гг. инициатива в исследовании микроводорослей перешла к представителям экологических наук, в 2020–2022 гг. эта тенденция лишь укрепилась (рис. 4).

База данных Scopus

Описанная тенденция в первую очередь обусловлена тем, что научная повестка в значительной мере определяется ростом экологической информированности и ответственности общества. Кроме того, экологические науки зачастую служат связующим звеном для других областей знания, имеющих то или иное отношение к микроводорослям. Общее число публикаций по теме, вышедших в 2000 и 2022 гг., с разбивкой по отраслям науки представлено на рис. 5.

Большинство статей, выявленных в ходе анализа, посвящены экологическим функциям микроводорослей (8962 публикации) и их применению в пищевой и химической промышленности (4275 и 4271 публикаций, соответственно). Более глубокий анализ показал, что в них чаще всего рассматриваются пигменты (1861), белки (1847), корма (1818), лекарства (1474), биотопливо (1014) и биотехнологии (892). Кроме того, в последнее время начали появляться статьи о нишевых рынках биостимуляторов (13), биопластиков (14), вакцин (16), биоудобрений (22) и нанотехнологий (59).

Рис. 2 наглядно иллюстрирует значительный рост числа статей по рассматриваемой тематике после 2010 г., что может объясняться активным внедрением микроводорослей в инновационном секторе экономик ряда стран, в частности в качестве сырья для производства биотоплива. Хотя в представленной статистике одна и та же публикация может относиться к нескольким странам и научными областям, исключение такого дублирования может исказить интерпретацию данных публикационной активности.

Мировой рынок микроводорослей по траектории своего роста близок к приведенной динамике публикационной активности и сегментирован по типам продуктов, областям их применения, штаммам микроводорослей и регионам (PMR, 2023) (табл. 1).

Рис. 4. Динамика научных публикаций об исследованиях микроводорослей в журналах сельскохозяйственного, биологического и экологического профиля, индексируемых Scopus



Рис. 5. Число научных публикаций об исследованиях микроводорослей в журналах, индексируемых Scopus, по отраслям знания (внешний круг — 2022 г., внутренний — 2000 г.)



Источник: составлено авторами на основе базы данных Scopus.

Региональная сегментация глобального рынка микроводорослей

Крупнейшим мировым рынком микроводорослей в 2022 г. оставалась Северная Америка, за которой следовали Европа и АТР². Лидерство первой обусловлено прежде всего высоким уровнем потребления пищевых добавок населением, строгим регулированием применения синтетических красителей и растущим спросом на натуральную косметику и биоудобрения. Кроме того, в регионе (прежде всего в США) находятся основные мощности ключевых производителей биомассы микроводорослей (The Insight Partners, 2021).

Структура рынка микроводорослей по регионам представлена на рис. 6.

По состоянию на конец 2020 г. объем американского рынка микроводорослей оценивался в 285 млн долл. (29.14% от мирового); прогнозируемый объем китай-

ского рынка к 2026 г. достигнет 253.5 млн долл. Среднегодовые темпы роста двух других заслуживающих внимания рынков — Японии и Германии — в период с 2020 по 2027 г. прогнозируются на уровне 4.2% и 4.7% соответственно³.

США

Благодаря быстрому технологическому развитию и эффективному государственному регулированию Северная Америка стала самым перспективным рынком для производства и реализации продуктов питания и напитков, лекарственных препаратов и товаров личной гигиены. Многие потребители в США и Канаде стремятся вести здоровый образ жизни и предпочитают полезные для здоровья продукты, что придает импульс развитию регионального рынка микроводорослей и производной продукции. Высокий платежеспособный спрос на качественные продукты и услуги подталкивает бизнес к инновационной деятельности для наилучшего его удовлетворения. Рост сопутствующих отраслей в регионе напрямую определяет динамику глобального рынка микроводорослей (The Insight Partners, 2021).

Благоприятный инвестиционный климат, эффективные механизмы привлечения капитала и передовые технологии сыграли ключевую роль в развитии рынка микроводорослей в США. Так, Программа развивающихся рынков (Emerging Markets Program)⁴, координируемая Министерством сельского хозяйства (United States Department of Agriculture, USDA), предусматривает поддержку экспорта сельскохозяйственной продукции (как традиционной, так и инновационной) национальных производителей; стипендиальная программа Борлауга (Borlaug Fellowship Program) направлена на

Рис. 6. Рынок микроводорослей по регионам, млн долл.



Источник: составлено авторами на основе (The Insight Partners, 2021).

² <https://www.researchandmarkets.com/reports/5790809/microalgae-global-market-report#rela1-5140359>, дата обращения 11.09.2023.

³ <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/microalgae-market>, дата обращения 11.09.2023.

⁴ <https://fas.usda.gov/programs/emerging-markets-program-emp>, дата обращения 07.01.2024.

Табл. 1. Основные сегменты рынка микроводорослей

Тип продукта
• Спирулина • Хлорелла • Пуфа • Лютеин • Другие
Штамм микроводорослей
• <i>Haematococcus Pluvialis</i> • <i>Phaeodactylum Tricornutum</i> • <i>Porphyridium Cruentum</i> • <i>Nannochloropsis</i> • Другие
Применение
• Продукты питания и напитки • Пищевые добавки • Фармацевтические препараты • Косметика и средства личной гигиены • Биотопливо • Удобрения • Корма • Другое
Регион
• Северная Америка (США, Канада, Мексика) • Европа (Франция, Германия, Британия, Италия, Испания, Нидерланды, Австрия, Россия) • Азиатско-Тихоокеанский регион (Япония, Китай, Индия, Малайзия, Индонезия, Южная Корея) • Латинская Америка (Бразилия, Аргентина) • Ближний Восток и Африка (Саудовская Аравия, ОАЭ, Израиль, Южная Африка)
Источник: составлено авторами.

поддержку ИиР и инновационной деятельности, в частности в области биотехнологий и ГМО⁵, а Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (Food and Drug Administration, FDA) одобрило использование препаратов Lina Blue на основе бета-каротина, полученного из микроводорослей *Spirulina* и *Dunaliella Salina*, в конфетах в качестве альтернативы синтетическим красителям (Chakraborty et al., 2019). Lina Blue позволяет окрашивать пищевые продукты в синий, красный, желтый и оранжевый цвета. Эти красители широко применяются в производстве кондитерских и молочных продуктов, конфет, жевательной резинки, мороженого и йогурта (Wang et al., 2022, Luzardo-Ocampo et al., 2021). В США и Канаде также одобрено использование микроводорослей *Haematococcus Pluvialis* в качестве ингредиента пищевых добавок⁶.

Благодаря этим усилиям, при совокупных годовых темпах роста в 2021–2028 гг. на уровне 8.1%, к 2028 г. североамериканский рынок продуктов из микроводорослей достигнет 776.43 млн долл. (The Insight Partners, 2021).

Азиатско-Тихоокеанский регион (Китай, Япония)
Совокупные годовые темпы роста рынка микроводорослей в АТР на горизонте 10 лет прогнозируются как

самые высокие в Азии вследствие роста потребления производной продукции⁷. Расширение и диверсификация сферы применения биомассы микроводорослей побуждают производителей искать возможности наращивания промышленных мощностей (Sarwer et al., 2022). Дальнейшему росту рынка будет способствовать также рост инвестиций, нацеленных на достижение устойчивого развития (Khan et al., 2018).

Правительство Китая прилагает большие усилия по внедрению продуктов на базе микроводорослей, способствуя наращиванию их производства (Chen et al., 2020). Благодаря этому Китай входит в число крупнейших игроков этого рынка (Chen et al., 2016). Из всех разновидностей в коммерческих целях в Китае (и в мире в целом) больше всего (по тоннажу) выращивается спирулины (*A. Platensis* и *A. Maxima*), впервые выращенной в стране в 1970-е гг., однако в силу технологических ограничений не пущенной в промышленное производство. В настоящее время спирулину разводят почти во всех провинциях и регионах страны, от южного Хайнаня до Внутренней Монголии и от Юньнана до Чжэцзяна (Chen et al., 2016). Базовая посевная площадь в 750 га в Китае обеспечивает сбор свыше 9 600 тонн сухого веса микроводорослей в год. Их розничная стоимость превышает 4 млрд юаней, из которых производственные затраты обычно составляют около 1/10 и увеличиваются по мере движения товара к потребителю (с учетом операционных издержек, инвестиций, маркетинга, формовки (таблетирование и т. п.), упаковки, доставки, распространения, рекламы, организации розничной торговли, налогов и т. д.) (Chen et al., 2016).

Хлореллу начали впервые коммерчески выращивать в Японии и Китае раньше, чем спирулину, в 1960-е гг., но технологические ограничения не позволили масштабировать ее производство в то время (Radmann et al., 2017, Chen et al., 2016). За последнее десятилетие Китай стал одним из крупнейших поставщиков хлореллы в мире, обогнав Японию. Хотя по масштабам выращивания она заметно уступает спирулине (примерно на четверть), цена за тонну хлореллы намного выше. Многие предприятия производят оба вида микроводорослей в рамках более крупного технологического процесса. Производить хлореллу технически сложнее и требует более значительных затрат в силу высоких рисков загрязнения и необходимости применять центрифуги для сбора микроскопических клеток. Это существенно отличается от более простой технологии сбора волокнистой спирулины, высокое содержание бикарбоната в среде выращивания которой существенно снижает экологические издержки. Как и спирулину, хлореллу сушат и продают в качестве пищевой добавки в виде порошка, таблеток или капсул (Chen et al., 2016).

В Китае в коммерческих целях выращивают еще два вида микроводорослей: дуналиеллу (*dunaliella*) и гематоккок (*haematococcus*), из биомассы которых извлекают ценные каротиноиды (бета-каротин и астаксантин,

⁵ <https://fas.usda.gov/programs/borlaug-fellowship-program>, дата обращения 07.01.2024.
⁶ <https://www.meticulousresearch.com/product/europe-microalgae-market-5491>, дата обращения 13.05.2023.
⁷ <https://www.transparencymarketresearch.com/microalgae-based-products-market.html>, дата обращения 07.01.2024.

Табл. 2. Компании – производители микроводорослей в промышленных масштабах

Тип микроводорослей	Число компаний-производителей	Объем производства (тонн)
Spirulina	222	142
Chlorella sp.	30	82
Nannochloropsis sp.	25	21
Haematococcus pluvialis	17	66
Tysochrysis lutea	10	Менее 1
Dunaliella salina	8	2
Phaeodactylum tricornutum	8	4
Tetraselmis sp.	16	5
Scenedesmus sp.	9	н/д
Porphyridium	7	Менее 1
Другие*	37	н/д

* *Thalassiosira sp.*, *Acutodesmus obliquus*, *Chaetoceros muelleri*, *Cyanidium caldarium*, *Euglena gracilis*, *Odontella aurita*.
Источник: (Araújo et al., 2021).

соответственно). Дуналиелла была впервые использована в коммерческих целях в Австралии и Израиле в 1980-е гг. (Borowitzka, 2018). Астаксантин применяется в первую очередь как кормовая добавка при разведении лосося и форели, для окраски мяса рыбы (Stachowiak, Szulc, 2021). Рыночная цена синтетического астаксантина составляет около 1000 долл. за 1 кг (Panis, Rosales Carreon, 2016). Природный астаксантин из микроводорослей коммерчески реализуется лишь в качестве пищевой добавки для человека, главным образом в силу высокой стоимости, почти десятикратно превышающей текущую цену синтетического астаксантина (Panis, Rosales Carreon, 2016). В Китае производство последнего из *Haematococcus Pluvialis* растет быстрыми темпами, прежде всего в провинциях Юньнань и Хубэй (Chen et al., 2016).

В Японии выращивание микроводорослей и выпуск производной продукции не рассматриваются в качестве отдельного сектора, поскольку в стране нет специализированных предприятий, несмотря на их очевидный потенциал, например, для поглощения выбросов CO₂ из окружающей среды. Вместе с тем, отдельные японские компании производят биомассу микроводорослей для переработки (Herrador, 2016). Уровень инвестиций в развитие данной технологии (и ожиданий их возврата) в стране остается одним из самых высоких в мире; особое внимание уделяется разработке решений для обеспечения бесперебойного энергоснабжения, формирования новых рынков продуктов питания, кормов и биохимии (например, пластиков). Подобные проекты

реализуются при поддержке правительства Японии, в них участвуют университеты, в частности Университет Цукуба (Tsukuba University) — мировой лидер ИиР в области выращивания различных видов микроводорослей (Herrador, 2016), и такие крупные игроки, как DENSO Corporation, Euglena Corporation, ISUZU Motors Corporation и All Nippon Airways. Японские ученые изучают также возможности применения микроводорослей для удаления радиоактивного цезия, йода и стронция из загрязненной водной среды в рамках устранения последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». Установлено, что некоторые виды микроводорослей способны поглощать до 89.2% цезия, 41.3% стронция и 65.9% йода (Fukuda et al., 2014).

Японская Организация по развитию новой энергетики и промышленных технологий (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO) в своем докладе 2016 г. отметила важность применения микроводорослей для выработки биоэнергоресурсов и преобразования CO₂ в топливо с помощью возобновляемой солнечной энергии — самой эффективной в сравнении с произведенной из любых других видов растений. В докладе отмечено, что «в будущем для снижения производственных затрат и повышения производительности на единицу площади... будет разработана система сбора, восстановления и очистки нефти», а также налажено производство топлива для реактивных двигателей (Herrador, 2016). Кроме того, в стране успешно реализован ряд проектов по замене традиционного авиационного топлива на экологически чистое, произведенное из микроводорослей, на котором в 2021 г. выполняли внутренние коммерческие рейсы крупнейшие японские авиакомпании⁸.

Европа (Германия)

На 2020 г. европейский рынок продуктов на основе микроводорослей был вторым по размеру в мире⁹. Рост спроса на такие продукты на континенте обусловлен рядом факторов, в частности их широким внедрением в производство продуктов питания и напитков, кормов, лекарственных препаратов и нутрицевтиков, товаров личной гигиены и т. д. Европейский рынок располагает значительным потенциалом для дальнейшего роста этого направления благодаря высоким темпам промышленного развития и уровню инвестиций в ИиР, способствующим диверсификации сфер приложения продуктов на основе микроводорослей. Быстрое расширение производственной базы в сочетании с повышением экономической активности и доступности капитала в регионе также стимулируют применение продуктов на базе микроводорослей (Enzing et al., 2014).

Существенный вклад вносит активное распространение в Европе «зеленой» повестки, прежде всего поиск альтернативных источников энергии для реализации

⁸ <https://www.greenairnews.com/?p=1239>, дата обращения 13.05.2024.

⁹ <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/microalgae-market>, дата обращения 11.09.2023.

¹⁰ <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/The%20Long-term%20Strategy%20under%20the%20Paris%20Agreement.pdf>, дата обращения 01.04.2022.

целей Парижского соглашения по климату¹⁰. Текущие приоритеты политики Европейского союза (ЕС) включают стимулирование перехода к устойчивой экономике, обеспечивающей оптимальный баланс роста, защиты окружающей среды и удовлетворения потребностей растущего населения. Биоэкономическая стратегия ЕС, принятая в 2012 г. и обновленная в 2018 г., направлена на формирование устойчивой биоэкономики замкнутого цикла по всей Европе, укрепление и развитие биосектора и устойчивых систем производства продуктов питания и других товаров (Vázquez-Romero et al., 2022). В Стратегии «синего роста» ЕС (EU Blue Growth Strategy) развитие «синих» биотехнологических отраслей объявлено одной из ключевых задач (European Commission, 2022).

В «Зеленом курсе» Европейской комиссии определены приоритетные направления, в которых технологии использования водорослей могут сыграть значимую роль: достижение климатической нейтральности к 2050 г., защита биоразнообразия, развитие экономики замкнутого цикла и реализация стратегии устойчивого развития продовольственного сектора «от фермы до стола» (*farm-to-table*) (European Commission, 2020). ЕС активно поддерживает различные проекты эксплуатации возобновляемых ресурсов, развития биоэнергетики и биопереработки, в том числе связанные с микроводорослями (Enzing et al., 2014).

В 2021 г. крупнейшим рынком микроводорослей на континенте оставалась Германия. Немецкие потребители уделяют серьезное внимание своему здоровью, обладают высокой экологической культурой и готовы больше платить за более натуральные и экологичные продукты с минимальным уровнем обработки. Такой интерес к товарам для улучшения физической формы и самочувствия стимулируется государственными образовательными программами, СМИ и рекламой, пропагандирующими здоровый образ жизни¹¹. Высокий уровень информированности граждан вынуждает игроков пищевой промышленности производить и продавать здоровые продукты и напитки.

Вместе с тем, ряд действующих ограничений приводят к тому, что в коммерческих целях в ЕС используется лишь небольшая часть существующих в природе видов микроводорослей. Освоению новых видов мешают и административные барьеры, а именно необходимость соблюдения Правил в отношении новых продуктов питания (New Foods Regulation) до вывода любых новых товаров на продовольственный рынок. Исполнение подобных требований остается весьма дорогостоящим и времязатратным. Тем не менее некоторые компании уже наладили стабильное производство и реализацию микроводорослей (Araújo et al., 2021) (табл. 2).

Биомасса микроводорослей преимущественно используется для производства пищевых добавок и нутрицевтиков (24%), косметики (24%) и кормов (19%). Спирулину выращивают в основном (75% от общего объема) для производства продуктов питания, пищевых добавок и нутрицевтиков (Araújo et al., 2021).

Несмотря на высокую коммерциализацию рынка микроводорослей в ЕС, производственные издержки и технологические ограничения, а также научные лакуны в понимании некоторых аспектов его развития сдерживают масштабирование выращивания биомассы как продукта с высокой добавленной стоимостью, за исключением выпуска массовой дешевой продукции (например, топлива) (Araújo et al., 2021).

Рыночная стоимость биомассы микроводорослей варьирует в зависимости от таких факторов, как организация производства, затраты на энергию и рабочую силу, география происхождения, порядок сертификации (например, органическое производство) и модель дистрибуции (B2B или B2C) (Lucakova et al., 2022). Так, в секторе B2B стоимость спирулины и хлореллы в пересчете на сухой вес находится в диапазоне 25–50 евро/кг и 30–70 евро/кг. соответственно (Araújo et al., 2021; Verdelho Vieira et al., 2022). В секторе B2C стоимость обоих видов микроводорослей варьирует от 150 до 280 евро/кг, поскольку готовые продукты в мелкой расфасовке стоят дороже (Araújo et al., 2021).

Цена *Nannochloropsis* sp., используемого преимущественно в производстве кормов (Qiao et al., 2019; Premachandra et al., 2023), в секторе B2B составляет от 30 до 110 евро/кг, а в B2C, где водоросль реализуется как морской фитопланктон, — может достигать 1000 евро/кг (Araújo et al., 2021). Цена на *N. pluvialis* в секторе B2C — 150–300 евро/кг, тогда как в B2B чистый астаксантин-олеорезин на основе чистого астаксантина реализуется по 6000–8000 евро/кг (Araújo et al., 2021). Появление новых сфер применения биомассы микроводорослей стимулирует рыночный спрос на нее при наличии значительного потенциала наращивания производства (Barone et al., 2023).

Компании-производители

На мировом рынке микроводорослей присутствует широкий круг игроков, выпускающих производную продукцию. К основным конкурентным преимуществам лидеров рынка относятся собственные инновационные разработки (так, израильская компания Algatech разработала уникальный метод массового выращивания микроводорослей в пустынных районах для последующего производства астаксантина) и высокая рыночная доля в наиболее привлекательных сегментах.

К ключевым производителям пигментов из водорослей относятся Earthrise Nutritionals (США), Cyanotech Corporation (США), Zhejiang Binmei Biotechnology (Китай), Bluetec Naturals (Китай), BlueBioTech (Германия), Algatechologies (Израиль), EID Parry (Индия), DIC Corporation (Япония), Tianjin Norland Biotech (Китай), AlgaeCan Biotech (Канада), AstaReal (Швеция), Algae Health Sciences (США), Sochim International SpA (Италия), DDW, The Color House (США), Chlostanin Nikken Nature (Китай), BASF (Германия) и др. Наряду с крупными компаниями в отрасли микроводорослей активно действуют и новые стартапы (табл. 3 и 4).

¹¹ <https://www.meticulousresearch.com/product/europe-microalgae-market-5491>, дата обращения 13.05.2023.

Табл. 3. Мировые стартапы в области микроводорослей

Название компании, страна, год основания	Направления деятельности
Brevel (Израиль), 2017*	Производство растительного белка, адаптированного к потребностям пищевой промышленности.
Brilliant Planet (Великобритания), 2017*	Уникальные решения по снижению выбросов CO ₂ : резервуары с морской водой, обеспечивающие оптимальные условия для выращивания водорослей, которые способны поглощать большие объемы CO ₂ .
NewFish (Новая Зеландия), 2020	Производство продуктов питания с помощью технологии ферментации микроводорослей.
Quazy Foods (Германия), 2021	Разработка конкурентоспособных полезных и устойчивых функциональных ингредиентов на основе микроводорослей, которые защищают также водные экосистемы; сенсорная и питательная оптимизация штаммов микроводорослей для широкого применения в пищевых продуктах.
PhycoWorks Ltd. (Великобритания), 2021	Производство ценных продуктов из отходов, ускорение перехода к биоэкономике замкнутого цикла.
Minus Materials (США), 2021	Улавливание и фиксация CO ₂ в форме биогенного известняка с помощью микроводорослей, солнечного света и морской воды, что снижает потребность в разработке известняковых карьеров и одновременно обеспечивает изъятие из атмосферы излишка CO ₂ .
Algicel ApS (Дания), 2021	Улавливание CO ₂ при помощи микроводорослей и высокопроизводительных компактных фотобиореакторов, способных поместиться в стандартный транспортный контейнер, с применением новой бизнес-модели распределения доходов.
GC Lipid Tech (Канада), 2021	Разработка экологически чистых, устойчивых, эффективных и безопасных биотехнологических решений с применением микроводорослей.
Ittinsect (Италия), 2020	Биотехнологическая переработка насекомых, микроводорослей и побочных продуктов сельского хозяйства для высокоэффективного и устойчивого производства кормов для аквакультуры в рамках стратегии отделения аквакультуры от морских ресурсов. В отличие от традиционных кормов предлагаемый продукт обеспечивает быстрое и стабильное разведение рыбы с устойчивой иммунной системой и низким риском заболеваний пищеварительной системы; в ходе его производства выбросы CO ₂ -эквивалента в расчете на килограмм продукта на 10% меньше, чем при выпуске традиционных аналогов, что уменьшает воздействие на окружающую среду и способствует снижению стресса для мелкой пелагической рыбы.
Sophie's Bionutrients (Сингапур), 2017	Выращивание микроводорослей в биореакторах, которые обеспечивают контролируемость процесса и получение белка за несколько дней с небольшим расходом воды и переработкой местных пищевых отходов городских агломераций во многих регионах мира; производство ингредиентов для пищевой промышленности исключительно из водорослей, например, в форме мяса растительного происхождения и функциональных продуктов питания.
Realm (Германия), 2022	Разработка нового экономически эффективного подхода к выращиванию микроводорослей при одновременной очистке сточных вод и снижении потребности в пресной воде.
Algaenergy (Испания), 2009	Пионерская разработка сельскохозяйственных биостимуляторов на основе микроводорослей и их дистрибуция по всему миру. Каждый стимулятор представляет собой оптимизированную комбинацию различных видов микроводорослей в определенных пропорциях в зависимости от состава, что обеспечивает необходимые элементы для физиологического развития растений. Огромное биоразнообразие микроводорослей, накопленные компанией знания и опыт и пять используемых технологий выращивания позволяют подобрать наиболее релевантную продукту биомассу. Продуктовая линейка не ограничивается запатентованными микроводорослями и включает также новый уникальный класс культур, сочетающий микроводоросли с питательными веществами для растений и биологическими элементами.
SeaH4 (ЮАР), 2021	Производство инновационной альтернативы ископаемому топливу с нулевой эмиссией CO ₂ , которая готова к конечному использованию, не требует инвестиций в транспортную инфраструктуру, модификации двигателей или распределительной сети.
Algaementum (Португалия), 2023	Создание специализированных полигонов для выращивания водорослей в центральной и восточной Португалии, уникальные возможности которой обусловлены обилием солнечного света, чистой воды и наличием квалифицированных человеческих ресурсов; производство питательных пищевых и кормовых ингредиентов в соответствии с высокими этическими и органическими стандартами ЕС без загрязнения среды пластиком, токсинами и тяжелыми металлами.
Carbon Kapture (Великобритания), 2020	Улавливание и фиксация CO ₂ с помощью глобальной сети ферм морских водорослей.

* Указан год основания самой компании. Реализация проекта началась в 2022 г.

Источник: составлено авторами.

Перспективы развития рынка

По прогнозам ООН, к 2050 г. численность мирового населения приблизится к 10 млрд чел. (United Nations, 2022), и удовлетворение их потребностей повлечет за собой необходимость удвоения производства продуктов питания (Henchion et al., 2017). Спрос на белок выступает ключевым драйвером роста рынка микроводорослей (Fatima et al., 2023) и обуславливает взрывной рост интереса к производным биотехнологиям. На сегодняшний день в мире существует множество успешных стартапов и коммерческих предприятий по производству биомассы микроводорослей и биопродуктов

из нее (Garrido-Cardenas, 2018). В качестве примеров успешно реализованных проектов в данной области можно назвать AlgaePARC (Амстердам, Голландия), Cyanotech (Гавайи, США), Roquette Klötze (Клетце, Германия), AstaREAL (Густавсберг, Швеция) и Algatech (Кетура, Израиль).

Значительного прогресса удалось достичь в изучении потенциала микроводорослей в целях разработки широкого спектра препаратов и материалов, от косметики и продуктов питания до различных видов пластмасс и биотоплива (Kandasamy et al., 2022). Их ключевое преимущество состоит в экологической нейтральности

Табл. 4. Российские стартапы в области микроводорослей

Название компании, Год основания	Выручка (тыс. руб., 2022 г.)	Направления деятельности
Биотрек (2022)	-	Разработка решений на базе искусственного интеллекта (ИИ) по выращиванию микроводорослей в наиболее благоприятных условиях.
Альгафуд (2021)	2233	Производство микроводорослей для пищевой промышленности, содержащих полный спектр аминокислот и витаминов.
Ля Водоросля (2023)	-	Разработка технологии выращивания матричных и промышленных культур различных штаммов морских микроводорослей.
Эй Джи Ти (2020)	92	Альгоремедиация водоемов для предотвращения их деградации в результате значительного антропогенного воздействия и выбросов токсичных биогенных элементов (эвтрофикации), концентрация которых обеспечивает быстрый рост водорослей и появление цианобактерий. Хлорелла активно очищает воду не только от органических, но и от неорганических соединений, снижая содержание фосфора, аммония, формальдегида, аммиака и др.
АА+ТЕХ (2020)	-	Переработка парниковых газов в экологически чистую продукцию с помощью фотосинтеза микроорганизмов силами международной команды с межотраслевым опытом. Уникальное сочетание управленческих навыков и специализированных знаний в области биофизики, биологии и цифровых технологий позволяет преобразовывать СО2 в полезные для здоровья продукты — пищевые добавки, нутрицевтики, ингредиенты (белки водорослей, антиоксиданты, пищевые красители, ПНЖК и др.). Проект основан на облачной системе менеджмента с применением ИИ и методов постоянной удаленной неинвазивной диагностики, а также непрерывного сквозного учета эквивалента СО2 в конечном продукте.
ЦВТ (2021)	375	Проектирование и производство биореакторов и мультиплатформенных реакторных биостанций на базе технологии управляемого газового вихря, обеспечивающей бережное и бесконтактное смешивание питательной среды и полезного вещества.
Альгавитапро (2018)	32 724	Услуги генетического секвенирования; разработка и вывод на рынок сельскохозяйственной кормовой добавки, сочетающей свойства пребиотика (зеленая микроводоросль хлорелла) и орексигена (функциональный пептид рубисколин-6), способной увеличивать среднесуточное потребление и конверсию корма, привес и конечную массу скота, что повышает экономическую эффективность агропредприятий и фермерских хозяйств.
Яр Лайн (2015)	111 460	Производство органоминерального удобрения «Чудорост» из биомассы микроводорослей.
Новые Пищевые Биотехнологии (2020)	-	Разработка биодоступных нутрицевтиков и методов их адресной доставки на основе каротиноидных экстрактов микроводорослей хлореллы (ядро), биоразлагаемого материала (оболочка) и технологий производства пищевых продуктов для функционального питания.
Никафреш (2020)	-	Разработка инновационных наноинкапсулированных каротиноидов с высокой биодоступностью и устойчивостью к температурному и ультрафиолетовому воздействию.

Источник: составлено авторами.

их производства и применения (Parveen et al., 2023). Микроводоросли все чаще используются как нутрицевтики в кормовой промышленности, особенно в аквакультуре — для улучшения иммунного ответа морской фауны (Khan et al., 2018; Camacho et al., 2019; Das et al., 2021). Вместе с тем, их коммерциализацию сдерживают высокие издержки хранения и трудности переработки для добавления в корма в качестве пребиотиков (Camacho et al., 2019). Серьезной проблемой остается и расширение производства: в настоящее время полномасштабный коммерческий выпуск налажен только в случае β-каротина и астаксантина (Camacho et al., 2019). Тем не менее выполненный нами библиометрический анализ показывает, что поиски путей интенсификации выращивания микроводорослей и увеличения их биомассы продолжаются.

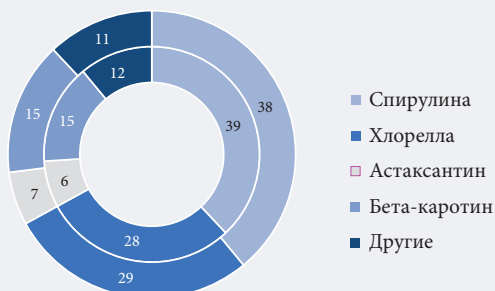
Согласно недавнему исследованию Persistence Market Research, рынок продуктов на основе микроводорослей будет расти в среднем на 5.4% в год, и к 2033 г. его объем превысит 5 млрд долл. (PMR, 2023). Однако, по нашим более консервативным оценкам, учитывающим совокупный годовой темп роста (по данным аналитиков, в среднем 6.8%) и базовый эффект 2021 г. (977.1 млн долл.), его объем составит 2 млрд долл. к 2030 г.

В течение прогнозного периода (2021–2031 гг.) рынки Южной и Восточной Азии будут расти в среднем на

7.8% и 6.8% соответственно, при сохранении лидерства североамериканского (28.8%) и европейского (27.9%) рынков (PMR, 2023). Рост последнего будет в значительной мере обеспечен расширением спектра применения микроводорослей, в особенности спирулины и хлореллы, в производстве пищевой и фармацевтической продукции, отказом от синтетических красителей, ростом спроса на натуральные синие красители и увеличением инвестиций в производство фикоцианинов¹². Вложения ЕС в рынок микроводорослей обусловлены целями развития возобновляемой энергетики и снижения выбросов СО₂. Еврокомиссия поддерживает ряд проектов по развитию производства биотоплива. Дальнейшему росту этого рынка на континенте будут способствовать расширение финансирования профильных ИиР, внедрение методов стандартизации создания и использования производных продуктов и ингредиентов в различных отраслях (Kuech et al., 2023).

Как уже упоминалось, на сегмент пищевых добавок и фармацевтических препаратов приходится основная доля рынка микроводорослей. Тем не менее, смещение потребительского интереса в сторону более питательных кормовых продуктов приведет к высоким совокупным годовым темпам роста сегмента кормов для животных и аквакультуры (PMR, 2023). Распространение лютеина как пищевой и кормовой добавки также может

Рис. 7. Рынок микроводорослей
(внутренний круг — 2020 г.,
внешний круг — прогноз на 2028 г.)



Источник: составлено авторами на основе (The Insight Partners, 2021).

стать перспективным направлением (Lin et al., 2015), в частности благодаря тому, что лютеин обладает антиоксидантными свойствами, противораковым действием, стимулирует развитие нервной системы младенцев (Hu et al., 2018) и играет важную роль в предотвращении катаракты (Manayi et al., 2016). Ожидается, что к 2027 г. продажи продуктов на основе лютеина из микроводорослей достигнут 450 млн долл. (Saha et al., 2020) при совокупном годовом темпе роста около 6.10% (Saha et al., 2020; Fu et al., 2023).

Структуру рынка производных продуктов по видам микроводорослей в 2020 г. (внутренний круг) и 2028 г. (внешний круг) можно отобразить следующим образом (рис. 7).

Библиография

- Воробьев В. В., Кожевников Ю. А., Щекочихин Ю. М. (2015) Микроводоросли для производства энергетической биомассы и топлива. *Инновации в сельском хозяйстве*, 2, 235–243.
- Пилигаев А. В., Самойлова Ю. И., Сорокина К. Н. (2014) Современное состояние и перспективы развития производства биотоплива из микроводорослей. *Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков*, 8, 21–27.
- Стребков Д. С., Щекочихин Ю. М., Росс М. Ю. (2012) Основные направления биотехнологического развития возобновляемой энергетики для производства альтернативных топлив из растительного сырья. *Вестник ВИЭСХ*, 1(6), 43–50.
- Abeer A. Z., Hammad D. M., Sharaf E. M. (2015) Antioxidant and Anticancer Activity of Spirulina Platensis Water Extracts. *International Journal of Pharmacology*, 11 (7), 846–851. <https://doi.org/10.3923/ijp.2015.846.851>
- Abu Zaid A. A., Hammad D. M., Sharaf E. M. (2015) Antioxidant and anticancer activity of spirulina platensis water extracts. *International Journal of Pharmacology*, 11, 846–851. <https://doi.org/10.3923/ijp.2015.846.851>
- Ahmad I., Abdullah N., Iwamoto K., Yuzir A. (2021) The Contribution of Microalgae in Bio-refinery and Resource Recovery: A Sustainable Approach Leading to Circular Bioeconomy. *Chemical Engineering Transactions*, 89, 391–396. <https://doi.org/10.3303/CET2189066>
- Araújo R., Vázquez Calderón F., Sánchez López J. S., Azevedo I. C., Bruhn A., Fluch S., García Tasende M., Ghaderiadekani F., Ilmjärv T., Laurans M., Mac Monagail M., Mangini S., Peteiro C., Rebours C., Stefansson T., Ullmann J. (2021) Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, 7, 626389. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.626389>
- Asada R., Cardellini G., Mair-Bauernfeind C., Wenger J., Haas V., Holzer D., Stern T. (2020) Effective bioeconomy? A MRIO-based socioeconomic and environmental impact assessment of generic sectoral innovations. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119946. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119946>
- Barkia I., Saari N., Manning S. R. (2019) Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and Nutrition. *Marine Drugs*, 17(5), 304. <https://doi.org/10.3390/md17050304>
- Bauer F. (2018) Narratives of biorefinery innovation for the bioeconomy: Conflict, consensus or confusion? *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 28, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2018.01.005>
- Befort N. (2020) Going beyond definitions to understand tensions within the bioeconomy: The contribution of sociotechnical regimes to contested fields. *Technological Forecasting and Social Change*, 153, 119923. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119923>
- Borowitzka M. A. (2018) Biology of Microalgae. In: *Microalgae in Health and Disease Prevention* (eds. I. A. Levine, J. Fleurence), Cambridge, MA: Academic Press, pp. 23–72. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811405-6.00003-7>

¹² <https://www.cbi.eu/market-information/natural-ingredients-health-products/chlorella-and-spirulina/market-potential>, дата обращения: 08.01.2024.

Заключение

Микроводоросли — перспективный ресурс, играющий важную роль в функционировании всей биосферы. В последние годы его промышленное выращивание и выпуск производной продукции привлекают растущий интерес, связанный с применением в самых разных отраслях экономики: в производстве продуктов питания, кормов, удобрений или нового источника энергии — биотоплива.

Динамика рынка и потребительский спрос на натуральные и полезные для здоровья продукты побуждают ученых и представителей бизнеса предлагать новые решения с функциональными ингредиентами. Микроводоросли служат ценным источником таких ингредиентов, благотворно воздействующих на здоровье: полиненасыщенных жирных кислот, полисахаридов, натуральных пигментов, необходимых минералов, витаминов, ферментов и биоактивных пептидов.

Объем рынка микроводорослей в 2021 г. составлял 977 млн долл., а его среднегодовые темпы роста прогнозируются на уровне 6.8%. По нашим оценкам, к концу 2030 г. доходы профильных компаний превысят 2 млрд долл. Рост рынков производной продукции в Южной и Восточной Азии в период 2021–2031 гг. в среднем прогнозируется на уровне 7.8% и 6.8% соответственно. Однако лидерами глобального рынка микроводорослей останутся Северная Америка и Европа (28.8% и 27.9%, соответственно).

Таким образом, производство продуктов на основе микроводорослей является динамичным рынком с огромным потенциалом для многих отраслей экономики, и дальнейшие исследования перспектив его развития представляют несомненный интерес.

- Bugge M.M., Hansen T., Klitkou A. (2016) What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability*, 8(7), 691. <https://doi.org/10.3390/su8070691>
- Camacho F., Macedo A., Malcata F. (2019) Potential Industrial Applications and Commercialization of Microalgae in the Functional Food and Feed Industries: A Short Review. *Marine Drugs*, 17(6), 312. <https://doi.org/10.3390/md17060312>
- Chakraborty C., Pinaki R., Manasi R., Chatterjee R. (2019) Applications of bio-colour in dairy industry. *The Pharma Innovation Journal*, 8(1), 126–138.
- Chen H., Wang X., Wang Q. (2020) Microalgal biofuels in China: The past, progress and prospects. *GCB Bioenergy*, 12(12), 1044–1065. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12741>
- Chen J., Wang Y., Benemann J., Zhang X., Hu H., Qin S. (2016) Microalgal industry in China: Challenges and prospects. *Journal of Applied Phycology*, 28, 715–725. <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0720-4>
- Chernova N.I., Korobkova T.P., Kiseleva S.V., Zaytsev S.I., Radomskii N.V. (2012) Microalgae as source of energy: current situation and perspectives of use. In: *Sustainable Manufacturing* (ed. G. Seliger), Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, pp. 221–224. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27290-5_34
- Chunzhuk E., Grigorenko A., Kiseleva S., Chernova N., Vlaskin M., Ryndin K., Butyrin A., Ambaryan G., Dudoladov A. (2023) Effects of Light Intensity on the Growth and Biochemical Composition in Various Microalgae Grown at High CO₂ Concentrations. *Plants*, 12, 3876. <https://doi.org/10.3390/plants12223876>
- Cid A., Prado R., Rioboo C., Suarez-Bregua P., Herrero C. (2013) Use of microalgae as biological indicators of pollution: Looking for new relevant cytotoxicity endpoints. In: *Microalgae: Biotechnology, Microbiology and Energy* (ed. M.N. Johnsen), New York: Nova Science Publishers, pp. 311–323.
- Das P., Nagappan S., AbdulQuadir M., Thaher M., Khan S., Mahata C., Hareb Al-Jabri, Vatland A.K., Kumar G. (2021) Potential of microalgae as a sustainable feed ingredient for aquaculture. *Journal of Biotechnology*, 341, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.09.003>
- Enzing C., Ploeg M., Barbosa M., Sijtsma L., Vigani M., Parisi C., Rodriguez Cerezo E. (2014) *Microalgae-based products for the food and feed sector: An outlook for Europe*, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- European Commission (2020) *Farm to Fork Strategy. For a fair, healthy and environmentally-friendly food system*, Brussels: European Commission.
- European Commission (2022) *EU Bioeconomy Strategy Progress Report. European Bioeconomy policy: stocktaking and future developments* (Report COM (2022) 283 final), Brussels: European Commission.
- Fatima N., Emambux M.N., Olaimat A.N., Stratakos A., Nawaz A., Wahyono A., Gul K., Park J., Hafiz Muhammad Shahbaz H.M. (2023) Recent advances in microalgae, insects, and cultured meat as sustainable alternative protein sources. *Food and Humanity*, 1, 731–741. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2023.07.009>
- Fernandez F.G.A., Reis A., Wijffels R.H., Barbosa M., Verdelho V., Llamas B. (2021) The role of microalgae in the bioeconomy. *New Biotechnology*, 61, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.11.011>
- Fu Y., Wang Y., Yi L., Liu J., Yang S., Liu B., Chen F., Sun H. (2023) Lutein production from microalgae: A review. *Bioresource Technology*, 376, 128875. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128875>
- Fukuda S.Y., Iwamoto K., Atsumi M., Yokoyama A., Nakayama T., Ishida K., Inouye I., Shiraiwa Y. (2014) Global searches for microalgae and aquatic plants that can eliminate radioactive cesium, iodine and strontium from the radio-polluted aquatic environment: A bioremediation strategy. *Journal of Plant Resources*, 127(1), 79–89. <https://doi.org/10.1007/s10265-013-0596-9>
- Garrido-Cardenas J.A., Manzano-Agugliaro F., Acien-Fernandez F.G., Molina-Grima E. (2018) Microalgae research worldwide. *Algal Research*, 35, 50–60.
- Gururani P., Bhatnagar P., Kumar V., Vlaskin M.S., Grigorenko A.V. (2022) Algal Consortia: A Novel and Integrated Approach for Wastewater Treatment. *Water*, 14(22), 3784. <https://doi.org/10.3390/w14223784>
- Henchion M., Hayes M., Mullen A.M., Fenelon M., Tiwari B. (2017) Future Protein Supply and Demand: Strategies and Factors Influencing a Sustainable Equilibrium. *Foods*, 6(7), 53. <https://doi.org/10.3390/foods6070053>
- Herrador M. (2016) *The Microalgae/Biomass Industry in Japan – An Assessment of Cooperation and Business Potential with European Companies*, Tokyo: EU-Japan Centre for Industrial Cooperation.
- Hossain N., Mahlia T.M.I., Saidur R. (2019) Latest development in microalgae-biofuel production with nano-additives. *Biotechnology for Biofuels and Bioprocesses*, 12, 125. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1465-0>
- Hu J., Nagarajan D., Zhang Q., Chang J.-S., Lee D.-J. (2018) Heterotrophic cultivation of microalgae for pigment production: A review. *Biotechnology Advances*, 36(1), 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.09.009>
- Kandasamy S., Zhang B., He Z., Bhuvanendran N., Elseesy A., Wang Q., Narayanan M., Thangavel P., Dar M. (2022) Microalgae as a multipotential role in commercial applications: Current scenario and future perspectives. *Fuel*, 308, 122053. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122053>
- Khan M.I., Shin J.H., Kim J.D. (2018) The promising future of microalgae: Current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, 17, 36. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>
- Kuech A., Breuer M., Popescu I. (2023) *Research for PECH Committee – The future of the EU algae sector*, Brussels: European Parliament.
- Kuldipsinh C., Tiwari N., Patani P. (2023) Algae: An Extensive Analysis Of Its Role In The Cosmetic Landscape. *Journal of Population Therapeutics & Clinical Pharmacology*, 30(1), 3826. <https://doi.org/10.53555/jptcp.v30i1.3826>
- Kumar K.J., Gururani P., Vlaskin M.S., Parveen A., Nanda M., Kurbatova A., Gautam P., Grigorenko A.V. (2022) Bio-flocculation of oleaginous microalgae integrated with municipal wastewater treatment and its hydrothermal liquefaction for biofuel production. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102340>
- Kuppan P., Sudharsanam A., Venkateswarlu K., Megharaj M. (2023) Solar technology-closed loop synergy facilitates low-carbon circular bioeconomy in microalgal wastewater treatment. *Clean Water*, 6, 43. <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00256-8>
- Lin J.-H., Lee D.-J., Chang J.-S. (2015) Lutein production from biomass: Marigold flowers versus microalgae. *Bioresource Technology*, 184, 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.099>
- Lucakova S., Branyikova I., Hayes M. (2022) Microalgal Proteins and Bioactives for Food, Feed, and Other Applications. *Applied Sciences*, 12, 4402. <https://doi.org/10.3390/app12094402>
- Luzardo-Ocampo I., Ramirez-Jimenez A.K., Yañez J., Mojica L., Luna-Vital D.A. (2021) Technological Applications of Natural Colorants in Food Systems: A Review. *Foods*, 10, 634. <https://doi.org/10.3390/foods10030634>
- Machado Sierra E., Serrano M.C., Manares A., Guerra A., Aranguren Diaz Y. (2021) Microalgae: Potential for Bioeconomy in Food Systems. *Applied Sciences*, 11, 11316. <https://doi.org/10.3390/app112311316>
- Makarova E.I., Oturina I.P., Sidiyakin A.I. (2009) Applied aspects of the use of microalgae – inhabitants of aquatic ecosystems. *Ecosystems*, 12(2), 120–133.
- Maltsev Y.I., Konovalenko T.V., Barantsova I.A., Maltseva I.A., Maltseva K.I. (2017) Prospects of using algae in biofuel production. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 3(8), 455–460. <https://doi.org/10.15421/021770>
- Manayi A., Abdollahi M., Raman T., Nabavi S.F., Habtemariam S., Daglia M., Nabavi S.M. (2016) Lutein and cataract: From bench to bedside. *Critical Reviews in Biotechnology*, 36(5), 829–839. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1049510>
- Masojidek J., Lhotský R., Štěrbová K., Zittelli C.G., Torzillo G. (2023) Solar bioreactors used for the industrial production of microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 107, 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12733-8>
- McCormick K., Kautto N. (2013) The bioeconomy in Europe: An overview. *Sustainability*, 5(6), 2589–2608. <https://doi.org/10.3390/su5062589>

- Mendonça I., Faria M., Rodrigues F., Cordeiro N. (2024) Microalgal-based industry vs. microplastic pollution: Current knowledge and future perspectives. *Science of The Total Environment*, 909, 168414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168414>
- Moreira J.B., Duarte S.T., Duarte J.S., Bezerra P.Q.M., Greque de Morais M., Vieira Costa J.A. (2023) Role of microalgae in circular bioeconomy: From waste treatment to biofuel production. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25, 427–437. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02149-1>
- Navarro F., Forján E., Vázquez M., Montero Z., Bermejo E., Castaño M.Á., Toimil A., Chagüaceda E., García-Sevillano M.Á., Sánchez M., Domínguez M.J., Pávaro R., Garbayo I., Vilchez C., Vega J.M. (2016) Microalgae as a safe food source for animals: Nutritional characteristics of the acidophilic microalga *Coccomyxa onubensis*. *Food and Nutrition Research*, 60, 30472. <https://doi.org/10.3402/fnr.v60.30472>
- O'Neill E.A., Rowan N.J. (2022) Microalgae as a natural ecological bioindicator for the simple real-time monitoring of aquaculture wastewater quality including provision for assessing impact of extremes in climate variance – A comparative case study from the Republic of Ireland. *Science of the Total Environment*, 802, 149800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149800>
- Onyeaka H., Miri T., Obileke K.C., Hart A., Anumudu C., Zainab T. (2021) Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. *Carbon Capture Science & Technology*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100007>
- Pahun J., Fouilleux E., Daviron B. (2018) De quoi la bioéconomie est-elle le nom? Genèse d'un nouveau référentiel d'action publique. *Natures Sciences Sociétés*, 26, 3–16. <https://doi.org/10.1051/nss/2018020>
- Panis G., Rosales Carreon J. (2016) Commercial astaxanthin production derived by green alga *Haematococcus pluvialis*: A microalgae process model and a techno-economic assessment all through production line. *Algal Research*, 18, 175–190. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.06.007>
- Parveen A., Bhatnagar P., Gautam P., Bisht B., Nanda M., Kumar S., Vlaskin M.S., Kumar V. (2023) Enhancing the bio-prospective of microalgae by different light systems and photoperiods. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 22(11), 2687–2698. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00471-9>
- PMR (2023) *Microalgae-based Products Market. Market study on microalgae-based products: market progressing on back of demand for more efficient animal feed solutions. Microalgae market segmented by spirulina, Chlorella, Dunaliella Salina product in food and feed industry, pharmaceutical industry, chemical industry*, London: Persistence Market Research.
- Ponnuvel D., Sowndhararajan K., Kim S. (2023) A Review of the Harvesting Techniques of Microalgae. *Water*, 15, 3074. <https://doi.org/10.3390/w15173074>
- Premachandra E., Balasooriya W., Premarathna M., Ekanayaka I. (2023) Nannochloropsis sp.: Culturing and Potential for Fish Feed Production. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 22, 2687–2698. <https://doi.org/10.1007/s43630-023-00471-9>
- Priya N., Deora P.S., Verma Y., Muhal R.A., Goswami C., Singh T. (2022) Biofuels: An alternative to conventional fuel and energy source. *Materials Today: Proceedings*, 48(5), 1178–1184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.227>
- Qi Y., Zhang X.J., Renier N., Wu Z., Atkin T., Sun Z., Ozair M.Z., Tchieu J., Zimmer B., Fattahi F., Ganat Y., Azevedo R., Zeltner N., Brivanlou A.H., Karayorgou M., Gogos J., Tomishima M., Tessier-Lavigne M., Shi S.H., Studer L. (2017) Combined small-molecule inhibition accelerates the derivation of functional cortical neurons from human pluripotent stem cells. *Nature Biotechnology*, 35(2), 154–163. <https://doi.org/10.1038/nbt.3777>
- Qiao H., Hu D., Ma J., Wang X., Wu H., Wang J. (2019) Feeding effects of the microalga *Nannochloropsis* sp. on juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). *Algal Research*, 41, 101540. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101540>
- Radmann E.M., Reinehr C.O., Costa J.A.V. (2007) Optimization of the repeated batch cultivation of microalga *Spirulina platensis* in open raceway ponds. *Aquaculture*, 265(1–4), 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2007.02.001>
- Ramanauskas N., Balezantis T., Streimikiene D. (2023) Biomass use and its implications for bioeconomy development: A resource efficiency perspective for the European countries. *Technological Forecasting and Social Change*, 193, 122628. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122628>
- Ramírez B.D.G., Valencia J.U.S., Arbelaez A.F.A., Herrera J.M., Rojano B.A. (2020) Oxidative, sensory and fatty acid profile evaluation of a yogurt with docosahexaenoic acid (Dha) extracted from microalgae oil. *Revista Chilena de Nutrición*, 47, 568–579.
- Remize M., Brunel Y., Silva J.L., Berthon J.Y., Filaire E. Microalgae n-3 PUFAs Production and Use in Food and Feed Industries. *Marine Drugs*, 19(2), 113. <https://doi.org/10.3390/md19020113>
- Saha S.K., Ermis H., Murray P. (2020) Marine Microalgae for Potential Lutein Production. *Applied Sciences*, 10, 6457. <https://doi.org/10.3390/app10186457>
- Sanghamitra P., Mazumder D., Mukherjee S. (2021) Treatment of wastewater containing oil and grease by biological method – a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 56, 394–412. <https://doi.org/10.1080/10934529.2021.1884468>
- Sarwer A., Hamed S.M., Ahmed I., Osman A.I., Jamil F., Al-Muhtaseb A.H., Alhajeri N.S., Rooney D.W. (2022) Algal biomass valorization for biofuel production and carbon sequestration: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 2797–2851. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01458-1>
- Singh A., Kushwaha A., Goswami S., Tripathi A., Bhasney S.M., Goswami L., Hussain C.M. (2022) Roadmap from microalgae to biorefinery: A circular bioeconomy approach. In: *Trends to Approaching Zero Waste* (eds. C.M. Hussain, S. Singh, L. Goswami), Amsterdam: Elsevier, pp. 339–360. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85403-0.00006-2>
- Stachowiak B., Szulc P. (2021) Astaxanthin for the Food Industry. *Molecules*, 26(9), 2666. <https://doi.org/10.3390/molecules26092666>
- The Insight Partners (2021) *Trends and growth analysis reports related to North America Microalgae-Based Products Market*, Pune (India): The Insight Partners.
- United Nations (2022) *World Population Prospects 2022: Summary of Results* (Report UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3), Vienna: United Nations.
- Vázquez-Romero B., Perales J.A., Pereira H., Barbosa M., Ruiz J. (2022). Techno-economic assessment of microalgae production, harvesting and drying for food, feed, cosmetics, and agriculture. *Science of The Total Environment*, 837, 155742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155742>
- Verdelho Vieira V., Cadoret J.-P., Acien F.G., Benemann J. (2022) Clarification of Most Relevant Concepts Related to the Microalgae Production Sector. *Processes*, 10, 175. <https://doi.org/10.3390/pr10010175>
- Vignesh K.S., Anandakumar I., Ranjan R., Borah D. (2021) Flood vulnerability assessment using an integrated approach of multi-criteria decision-making model and geospatial techniques. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 767–781. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00997-2>
- Vlaskin M.S., Vladimirov G.N. (2018) Hydrothermal Carbonization of Organic Components from Municipal Solid Waste. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 52(6), 996–1003. <https://doi.org/10.1134/S0040579518050421>
- Wang J., Hu X., Chen J., Wang T., Huang X., Chen G. (2022) The Extraction of β -Carotene from Microalgae for Testing Their Health Benefits. *Foods*, 11, 502. <https://doi.org/10.3390/foods11040502>
- Wydra S., Hüsing B., Köhler J., Schwarz A., Schirrmeister E., Voglhuber-Slavinsky A. (2021) Transition to the bioeconomy – Analysis and scenarios for selected niches. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126092. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126092>
- Zhang S., Zhang L., Xu G., Li F., Li X. (2022) A review on biodiesel production from microalgae: Influencing parameters and recent advanced technologies. *Frontiers in Microbiology*, 13, 970028. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.970028>