

*М. А. Еськова, Я. В. Устинская, А. К. Брянкина,
И. А. Протопопов, Е. И. Шишков, М. С. Темнов**

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Микроводоросли обладают большим потенциалом для производства различных продуктов. В сравнении с выращиванием других продовольственных и энергетических культур культивирование микроводорослей не требует землепользования и не способствует загрязнению окружающей среды. Но несмотря на данные преимущества, коммерциализация технологий культивирования микроводорослей все еще находится на начальной стадии из-за проблем, препятствующих использованию микроводорослей в промышленных масштабах (высокая стоимость производства и др.). Комплексная биопереработка микроводорослей может снизить экономические затраты и повысить устойчивость производства, поэтому необходимо изучение потенциала использования биомассы микроводорослей. Целью данного исследования является обзор потенциальных промышленных применений микроводорослей и их компонентов.

Биотопливо. Биотопливо – чистый альтернативный источник топлива, который может заменить ископаемое топливо. В последнее время водоросли привлекают в качестве потенциального сырья для биотоплива, что связано с преимуществами их использования: высокая скорость накопления биомассы, высокое содержание липидов, устойчивость к экстремальным условиям окружающей среды. Общее содержание липидов некоторых видов микроводорослей может достигать 30 – 60% от сухого веса [1]. Среди видов микроводорослей для производства биотоплива выделяют следующие: *Chlorella vulgaris*, *Kirchneriella lunaris*, *Lyngbya kuetzingii*, *Selenastrum capricornutum*, *Scenedesmus obliquus*, *Phaeodactylum tricornerutum*, *Isochrysis sphacrica*. Данные виды обладают высокой липидной продуктивностью, синтезируют преимущественно ненасыщенные жирные кислоты, получаемый из них биодизель имеет высокое цетановое число и относительно низкую температуру помутнения.

* Работа выполнена под руководством заведующего кафедрой «ТОПиХП», д-ра техн. наук, проф. Д. С. Дворецкого.

Биогаз. Производство биогаза из микроводорослей происходит путем анаэробного переваривания биомассы микроводорослей бактериями.

Микроводоросли считаются выгодным субстратом для анаэробного сбраживания благодаря высокой продуктивности биомассы и низкому содержанию золы. При выборе видов водорослей отдают предпочтение штаммам, имеющим тонкие клеточные стенки, что делает их более легко разлагаемыми. Помимо легкой разлагаемости, необходимо учитывать и другие характеристики, такие как производительность или чувствительность к контаминации. Если выбранный вид обладает жесткими клеточными стенками необходимо применение соответствующей предварительной обработки. Среди перспективных видов для производства биогаза выделяют: *Arthrospira platensis*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella kessleri*, *Dunaliella salina*, *Euglena gracilis*, *Nanochloropsis* spp., *Scenedesmus obliquus*, *Spirulina maxima*.

Косметика. Экстракт микроводорослей, как правило, *Chlorella vulgaris* specie, *Chlorogloeopsis* spp., *Isochrysis*, *Nanochloropsis* обладает способностью защищать от солнечного излучения (светопоглощение) благодаря наличию в своем составе хлорофилла-а, спорополленина и микоспориноподобных аминокислот, в связи с этим он применяется в качестве компонента солнцезащитных средств. Некоторые белки и гидролизаты водорослей рода *Porphyra*, *Spirulina* sp. и *Chlorella* sp. обладают сродством с белками кожи и волос, обеспечивая удержание влаги и подходящую вязкость. В связи с этим косметика, содержащая белки водорослей, может быть использована в продуктах для ухода за кожей и волосами, шампунях, красках для волос. Экстракты *Chlorococcum* sp. и *Chlorella vulgaris* могут использоваться в антивозрастных продуктах, так как способны стимулировать выработку коллагена и способствуют регенерации тканей. Экстракт *Nanochloropsis oculata*, содержащий зеаксантин, способен ингибировать фермент тирозиназу, таким образом предотвращая гиперпигментацию кожи и стимулируя обесцвечивание пигментных пятен. Экстракты *Monodus* sp., *Thalassiosira* sp., *Chaetoceros* sp., *Chlorococcum* sp. способны модулировать меланогенез, стимулировать дифференцировку кератиноцитов в волосах человека, ускорять их рост и поэтому могут использоваться в составах средств для предотвращения выпадения волос.

В настоящее время существует несколько брендов по производству косметических средств на основе микроводорослей. К примеру, японская компания Sun Chlorella выпускает увлажняющий крем для лица Sun Chlorella Cream®, производимый на основе экстракта *C. pyrenoidosa*. Данный крем способствует увлажнению и обновлению

клеток кожи. Другой пример – французской компанией ProTec Ingredia, выпускающая крем из экстракта *C. vulgaris* Dermo Chlorella. Крем оказывает укрепляющее и реструктурирующее действие на контур глаз, а также стимулирует синтез коллагена.

Пигменты. Пигменты микроводорослей: хлорофилл, каротиноиды, фикобилипротеины, астаксантин и ксантофилл часто используются в таких отраслях промышленности, как пищевая, нутрицевтическая, фармацевтическая, аквакультура и косметическая промышленность; а также в исследовательских лабораториях [2]. В качестве продуцентов пигментов используются следующие виды микроводорослей: бета-каротин – *Scenedesmus almeriensis*, *Dunaliella abardawil*, *Dunaliella salina*, ликопин – *Chlorella marina*, лютеин – *Chlorella protothecoides*, *Scenedesmus salmeriensis*, *Dunaliella salina*, астаксантин – *Chlamydomonas*, *Chlorella*, *Haematococcus*, хлорофилл – *Chlorella sp.*, *Chlorella minutissima*, *Dunaliella primolecta*, *Nannochloropsis oculata*.

Очистка сточных вод. Микроводоросли могут очищать городские, промышленные, агропромышленные и животноводческие сточные воды [3]. При использовании микроводорослей отмечается значительное снижение химической потребности в кислороде. В качестве биологических агентов при очистке сточных вод используют *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Oscillatoria*, *Micractinium*. Также микроводоросли способны эффективно поглощать тяжелые металлы из сточных вод, например, *Chlorella vulgaris* поглощает Pb^{2+} .

Применение в сельском хозяйстве. Микроводоросли могут быть полезны при минерализации питательных веществ почвы, в качестве стимуляторов роста растений, рекультивации пустырей, защиты растений. Показано, что биомасса микроводорослей содержит микро- и макроэлементы: азот, фосфор и калий, и может применяться в качестве органического удобрения. Микроводоросли семейств *Chlorophyceae*, *Trebouxiophyceae*, *Ulvophyceae* и *Charophyceae* могут применяться в качестве биостимуляторов за счет содержания в своем составе следующих веществ: бетаины, аминокислоты, витамины и полиамины, стимулирующие рост растений. Применение экстрактов микроводорослей *Chlorella*, *Dunaliella spp.* и *Phaeodactylum spp.* может обеспечить защиту растений от абиотических стрессов: солевого и водного. Биостимуляторы и биоудобрения на основе микроводорослей считаются экологичными и экономически выгодными.

Животноводство. В животноводстве микроводоросли применяются при обогащении кормов. Добавляемая биомасса микроводорослей положительно влияет на физиологию животных, улучшая их иммунный ответ, сопротивляемость болезням и функцию кишечника, способствует набору веса. В частности, использование *Chlorella vulgaris*

при кормлении молочного скота приводит к изменению профиля жирных кислот в молоке, добавление микроводорослей в корма, предназначенные для ягнят и лошадей, увеличивают содержание жирных кислот в полученном мясе, включение *Arthrospira platensis* в корма для домашней птицы способствовало лучшему набору веса.

Фармацевтика. Микроводоросли являются богатым источником биологически активных первичных и вторичных метаболитов (например, жирные кислоты, полисахариды, терпены, индолы и фенолы). Данные метаболиты представляют интерес для фармацевтической промышленности. Доказано, что водорослевые экстракты (например, *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas pyrenoidosa*) обладают антибактериальной активностью *in vitro* как против грамположительных, так и против грамотрицательных бактерий. Также сообщается, что экстракт микроводорослей обладает противогрибковой активностью. Некоторые микроводоросли, например *Dunaliella salina* и *Chlorella pyrenoidosa* могут использоваться в качестве противоаллергенных средств за счет их способности снижать выработку цитокинов.

Крупномасштабное культивирование микроводорослей может быть полезно для коммерциализации биотоплива и продуктов с высокой добавленной стоимостью. Также микроводоросли могут быть использованы для уменьшения выбросов CO₂. Таким образом, микроводоросли являются безопасным сырьем, которое предлагает целый арсенал ценных коммерческих продуктов в различных отраслях промышленности.

Статья написана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – грант МК-2235.2020.8.

Список литературы

1. Dvoretzky, D. The study of the lipid extraction process for the production of third-generation biofuel from the pre-treated microalgae *Chlorella vulgaris* biomass / D. Dvoretzky et al // Chemical Engineering Transactions. – 2019. – V. 74. – P. 73 – 78.
2. Mulders, K. J. M. Phototrophic Pigment Production with Microalgae: Biological Constraints and Opportunities / K. J. M. Mulders et al // Journal of Phycology. – 2014. – V. 50 (2). – P. 229 – 242.
3. Dvoretzky, D. The technology of pre-purification treatment of municipal wastewater using microalgae *Chlorella vulgaris* / D. Dvoretzky et al. // Chemical Engineering Transactions. – 2017. – V. 57. – P. 49 – 54.

Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств» ФГБОУ ВО «ТГТУ»