

**ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ
(05.14.08)
БИОТЕХНОЛОГИЯ
(В ТОМ ЧИСЛЕ БИОНАНОТЕХНОЛОГИИ)
(03.01.06)**

УДК 620.95:504.7

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-4-68-74

Современные технологии конверсии биомассы микроводорослей в различные виды биотоплива

Н.И. Чернова, С.В. Киселева

Поиск альтернативных источников биомассы как сырья для биоэнергетики в настоящее время — актуальная фундаментальная и прикладная научная задача. Микроводоросли в силу особенностей их физиологии, высокой производительности, потенциала потребления углекислого газа из атмосферы являются одним из примеров таких источников.

Представлены результаты многолетних исследований НИЛ ВИЭ МГУ имени М.В. Ломоносова в области разработки технологии крупномасштабного культивирования микроводорослей, методов повышения производительности их по биомассе и целевым продуктам (липидам, углеводам), получения из биомассы различных видов биотоплива (биодизеля, бионефти, синтез-газа, метана и др.). Показана возможность попутной очистки сточных вод, утилизации CO₂ и производства ценных сопутствующих продуктов при промышленном культивировании микроводорослей.

Ключевые слова: микроводоросли, биотопливо, гидротермальное сжижение, очистка сточных вод, улавливание CO₂.

Для цитирования: Чернова Н.И., Киселева С.В. Современные технологии конверсии биомассы микроводорослей в различные виды биотоплива // Вестник МЭИ. 2022. № 4. С. 68—74. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-4-68-74.

Modern Technologies for Converting Microalgae Biomass into Various Kinds of Biofuel

N.I. Chernova, S.V. Kiseleva

Searching for alternative sources of biomass as a raw material for bioenergy is currently an urgent fundamental and applied scientific problem. Microalgae, due to the peculiarities of their physiology, high productivity, and the potential to consume carbon dioxide from the atmosphere, are one of the examples of such sources. The article presents the results of long-term research conducted at the Moscow State University's Laboratory of Renewable Energy Sources on developing a technology for large-scale cultivation of microalgae, methods for increasing their productivity in terms of biomass and target products (lipids and carbohydrates), and obtaining various types of biofuels from biomass (biodiesel, bio-oil, synthesis gas, methane, etc.). The possibility of associated wastewater treatment, CO₂ utilization, and obtaining of valuable by-products in the industrial cultivation of microalgae is shown.

Key words: microalgae, biofuel, hydrothermal liquefaction, wastewater treatment, CO₂ capture.

For citation: Chernova N.I., Kiseleva S.V. Modern Technologies for Converting Microalgae Biomass into Various Kinds of Biofuel. Bulletin of MPEI. 2022;4:68—74. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-4-68-74.

Введение

Поиск альтернативы ископаемому углеводородному топливу — актуальная задача в настоящее время. Микроводоросли (МКВ) привлекают все больший интерес в качестве перспективного исходного сырья для производства биотоплива третьего поколения, поскольку обладают высокой продуктивностью как по биомассе, так и по целевым продуктам (липидам, углеводам, белкам и др.) [1]. Водоросли являются автотрофными организмами. В процессе роста они накапливают липиды (масло) и углеводы, легко перерабатываемые в различные виды топлива [2, 3]. Для выращивания водорослей не требуются пахотные земли, а использование сточных вод в качестве питательной среды позволит на 90% снизить потребность в воде и полностью удовлетворить нужду в питательных веществах [4]. Производство микроводорослей оптимизируется путем применения низкотемпературных тепловых отходов, газообразных выбросов электростанций и промышленных предприятий и др. [5]. Еще одно преимущество микроводорослей, как источника сырья для производства биотоплива, заключается в разнообразии способов выращивания (открытые пруды, фотобиореакторы и замкнутые системы). Проведены исследования по генетической модификации разных видов микроводорослей для непосредственного производства из них биодизеля, биобутанола, биоэтанола, биометана и реактивного топлива [3, 6].

Текущее внимание к проблемам изменения климата делает микроводоросли, как и другие виды биомассы, важным инструментом снижения выбросов углекислого газа. Изъятие культивируемой биомассы МКВ для нужд энергетики не нарушает естественную консервацию органического вещества в биосфере, и в этом контексте плантации МКВ можно рассматривать как эффективный краткосрочный сток антропогенного CO_2 и способ конвертирования его в энергию высокой плотности. Данный фактор позволяет учесть секвестирование CO_2 при оценке рентабельности производства биотоплива из МКВ и рассмотреть в качестве методов кратко/средне/долгосрочного улавливания и хранения CO_2 следующие водорослевые технологии:

- захоронение общей биомассы МКВ в глубоких геологических образованиях;
- захоронение богатых углеродом фракций, извлеченных из биомассы водорослей;
- конверсию МКВ технологией гидротермального сжижения (Hydrothermal Liquefaction (HTL)), в результате которой 55% углерода биомассы превращается в биоуголь, содержащий около 90% углерода, с последующим захоронением этого геологически стабильного биоугля [7].

Цель представленной работы — характеристика современного состояния исследований в области микроводорослевой энергетики и результаты, полученные лабораторией возобновляемых источников энергии МГУ имени М.В.Ломоносова (НИЛ ВИЭ МГУ).

Материалы и методы.

В НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ создана технология крупномасштабного выращивания биомассы МКВ в открытых плоскостных культиваторах для целей энергетики (от получения метана анаэробным сбраживанием МКВ в метантенках на первых этапах исследований, до трансформации МКВ в широкую линейку жидких и газообразных биотоплив). Одновременно с этим развивались методы попутного использования биомассы в качестве пищевых и кормовых биодобавок, что позволило удешевить процесс получения энергетических продуктов.

Идея создания системы «Биосоляр» для культивирования микроводорослей дешевым масштабируемым способом с последующей конверсией их в биотопливо предложена основателем лаборатории доктором физ.-мат. наук В.В. Алексеевым.

Помимо стационарных (рис. 1) разработаны, созданы и апробированы в натуральных условиях оригинальные плавучие фотоблоки, позволяющие использовать для культивирования акваторию прибрежных районов морей, озера и водохранилища [8].

В 1988 — 2008 гг. проведены многолетние эксперименты по апробации выращивания микроводоросли/цианобактерии артроспире/спирулины открытым способом:

- на лабораторных установках в НИЛ ВИЭ объемом 500 и 1000 л системы «Биосоляр»;
- в натуральных экспериментах в Крыму (п. Качивели), где были созданы культиваторы на суше и морской акватории;
- в тепличных комплексах Подмосковья, Поволжья, Свердловской области, Приднестровья, Украины, Эстонии (рис. 2). Общая площадь, занятая под культиваторы, достигала 15 000 м².

На практике детально разработан вопрос, связанный с лабильностью биохимического состава представленных видов микроводорослей (изменениями биохимического состава под воздействием условий окружающей среды), что позволило осуществить направленный биосинтез целевых продуктов в биомассе.

В последние годы основными направлениями научно-исследовательских работ стали поиск в природной среде, выделение, и изучение тех штаммов микроводорослей, которые могут стать перспективным сырьем для производства биотоплива третьего поколения. Проведен ряд экспедиционных исследований (озера Карелии и Валдая; Байкал, озера и термальные источники Камчатки и др.), давших большой объем выделенных штаммов с повышенным содержанием липидов в биомассе. Значительное содержание липидов (масла) в клетках микроводорослей позволяет получить из них биодизельное топливо, что и определило интерес именно к этому направлению исследований. Лабораторией создана коллекция микроводорослей энергетического назначения и обоснована ее необходимость.

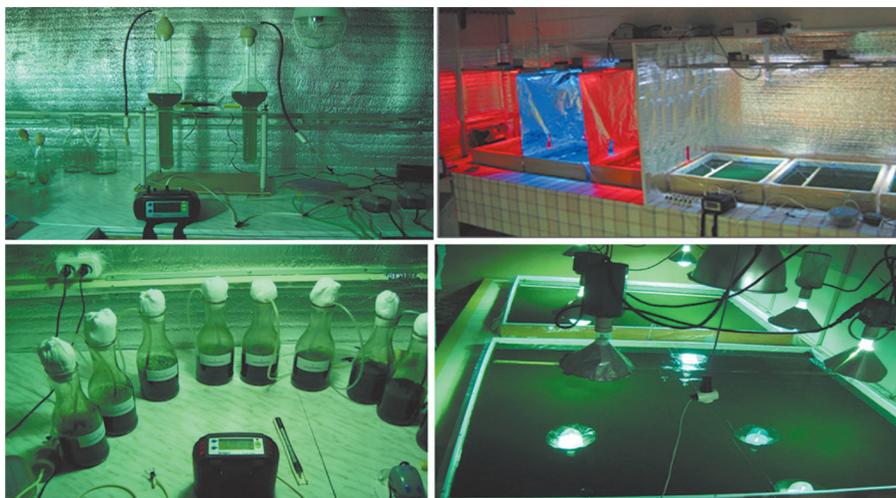


Рис. 1. Экспериментальные установки для культивирования микроводорослей НИЛ ВИЭ: слева — закрытые фотобиореакторы; справа — малые (объемом 20...30 л) и большие (500 л) открытые фотобиореакторы



Рис. 2. Апробация технологии НИЛ ВИЭ по выращиванию микроводорослей/цианобактерий артроспиры/спирулины в тепличных комплексах Московской области

Выделенные в процессе первичного скрининга кандидатные штаммы микроводорослей составили основу постоянно пополняющейся коллекции. Выделение из природной среды микроводорослей-продуцентов липидов проводили на основе окрашивания клеток МКВ различными красителями: суданами и специфическим на нейтральные липиды флуоресцентным красителем Нильским красным с последующей регистрацией в люминесцентном микроскопе.

По результатам длительных экспериментальных работ обоснованы способы индукции (увеличения) синтеза липидов в кандидатных штаммах МКВ. Установлено, что для увеличения содержания липидов в биомассе может быть использовано воздействие различных стрессоров, в качестве которых предложены пониженная и повышенная инсоляция, лимитирование питательных сред и голодание по азоту, фосфору и

кремнию, повышенные и пониженные температуры, а также разные концентрации CO_2 [9, 10].

Для производства конкурентоспособного биодизельного топлива из биомассы МКВ необходимо большое количество дешевой биомассы с повышенным содержанием липидов, но одновременное достижение высокой продуктивности по биомассе и по липидам при культивировании МКВ невозможно, поскольку максимальное накопление биомассы происходит при подборе оптимальных условий роста и развития клеток, а индукция повышенного синтеза целевых продуктов осуществляется в условиях дефицита биогенных элементов или при других стрессорах, когда рост клеток не происходит, поэтому эти две взаимоисключающие друг друга стадии были разнесены по времени за счет организации двухстадийного культивирования МКВ. На первой стадии в оптимальных условиях роста интенсивно наращивали биомассу, а на второй, путем воздействия различного вида физиологического стресса, индуцировали синтез и аккумулировали целевой продукт. Таким образом, средством максимального накопления биомассы МКВ с оптимальным содержанием липидов стало проведение культивирования в две стадии.

Для экспериментального обоснования технологии двухстадийного культивирования липидосодержащих микроводорослей разработан и создан фотобиореактор со светодиодной системой освещения с максимальной интенсивностью освещения до $550 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \times \text{sec})$ и контролируемой подачей углекислого газа, позволяющий проводить селекционные и физиолого-биохимические исследования отобранных штаммов МКВ для увеличения выхода биомассы (на первом этапе культивирования) и повышения содержания липидов в клетках полученной биомассы микроводорослей под воздействием различных стрессоров (на втором этапе) [11].

Результаты и обсуждение.

Приведем наиболее важные результаты разработки технологий культивирования микроводорослей и получения из них биотоплива третьего поколения, полученные за последние годы в НИЛ ВИЭ.

Апробированы технологии получения из выращенной биомассы двенадцати вновь выделенных и идентифицированных кандидатных штаммов МКВ биоводорода, биобутанола, биоэтанола, пиролизной бионефти, биогаза и биодизеля (совместно со специалистами ИБХФ им. Н.М. Эмануэля РАН и химического факультета МГУ при выполнении ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007 — 2013 гг.»).

Наиболее перспективными по выходу биоводорода и биобутанола технологией ацетобутиловой ферментации иммобилизованными клетками *Clostridium acetobutylicum* оказались культуры микроводорослей *Chlorococcum sp.* (выход H_2 от теоретически возможного — 33,3%, биобутанола — 60,5%) и культура *Arthrospira platensis* (выход H_2 от теоретически возможного — 32,3%, биобутанола — 31,6%). Максимальный выход биоэтанола от теоретически возможного технологией спиртового брожения дали культуры *A. platensis* (13,5%) и *Chlorococcum sp.* (26,1%). Максимальный выход пиролизной бионефти продемонстрировали культуры *Chlamydomonas* (58%) и *A. platensis* (55%). Эффективность метаногенеза при анаэробной ферментации для культуры *A. platensis* составила 51,2%, для *Chlorella vulgaris* — 26,1%. Максимальный выход биодизеля технологией переэтерификации липидов обнаружен у культуры *A. platensis* — 411 мг/(г биомассы) и у *Chlamydomonas* — 471 мг/(г биомассы).

Совместно со специалистами ОИВТ РАН были апробированы следующие методы трансформации выращенной биомассы *A. platensis rsemsu Bios* из коллекции НИЛ ВИЭ в бионефть, синтез-газ и биоуголь: медленный пиролиз и гидротермальное сжижение. В результате пиролиза биомассы МКВ получены следующие продукты:

- бионефть (пиролизная жидкость) — 21,9% от исходной массы;
- неконденсируемые пиролизные газы массой 1,15 л; удельный объемный выход газа (количество газа, выделившегося из 1 кг исходного материала) составил 0,076 nm^3/kg ;
- биоуголь • 27,0% от исходной массы МКВ (с учетом технических потерь в реакторе (9,3%) от исходной массы МКВ) [12].

Среди технологий производства биотоплива выделяют гидротермальное сжижение (НТЛ), поскольку оно позволяет перерабатывать влажную биомассу (без предварительной сушки) и превращать все углеродсодержащие компоненты (липиды, углеводы, белки) в энергоносители (бионефть или Biocrude, синтез-газ

и твердые горючие продукты (Biochar)). В процессе НТЛ биомассу подвергают термическому воздействию (температура до 370 °С) при давлении до 25 МПа, что считается большим энергетическим преимуществом по сравнению с методами конверсии в энергетические продукты сухой биомассы МКВ.

Установлено, что биомасса МКВ с повышенным содержанием липидов в наибольшей степени пригодна для конверсии ее в бионефть, поскольку 75% от массы нейтральных липидов приходится на углерод, а их содержание достигает 60% от общей сухой массы водорослей. Таким образом, липиды представляют собой богатые источники связанного углерода в клетках МКВ.

Вторым фактором использования липидосодержащих штаммов МКВ для НТЛ является то, что МКВ с наибольшим содержанием липидов содержат меньшее количество белков, что также важно для получения качественной бионефти. Из коллекции НИЛ ВИЭ были выбраны 3 штамма МКВ на основе их физиолого-биохимических характеристик с достаточно высокой скоростью роста (от 0,18 до 0,25 г/л/сут. по сухому весу, повышенное содержание липидов, пониженное содержание белка) и способных реагировать на физиологический стресс во второй стадии выращивания накоплением липидов в клетках.

Образцы биомассы кандидатных штаммов трансформировали в бионефть методом НТЛ на установках ОИВТ РАН при различных режимах ($T = 228, 260, 300$ и 350 °С, рабочее давление — до 250 атм.). В результате гидротермального сжижения биомассы одного из штаммов микроводорослей (*A. platensis rsemsu 1/02-P*) получены следующие продукты:

- бионефть (выход продукта при 270, 300 и 330 °С составил 34,6; 38,8; 45,7%, соответственно);
- синтез-газ (выход продукта — 12,7; 14,8 и 17,5%, соответственно);
- биоуголь (выход продукта — 28,7; 27,4 и 26,0%, соответственно).

Молекулярный и элементный составы полученной методом НТЛ бионефти изучили с помощью широкого спектра методов [13, 14]. Сделан вывод, что большинство химических соединений, входящих в состав бионефти, полученной гидротермальным сжижением, содержится и в традиционной нефти, а повышение содержания липидов в микроводорослях ведет, как правило, к большему совпадению составов химических соединений бионефти и традиционной нефти. Таким образом, получаемая методом НТЛ бионефть потенциально может быть интегрирована в существующую нефтеперерабатывающую инфраструктуру, в том числе, для производства моторного топлива. Источниками биомассы микроводорослей для производства бионефти могут служить биологические системы очистки сточных вод (а также газообразных промышленных выбросов).

Следует отметить, что выход бионефти, полученной технологией НТЛ (38,8...45,7 %), существенно выше, чем при пиролизе (21,9%). Выход биоугля при использовании обеих технологий находится одинаково на высоком уровне — около 27%. Биоуголь, состоящий на 90% из углерода и являющийся геологически устойчивой его формой, можно рассматривать как еще одну альтернативную стратегию поглощения и последующего захоронения углерода.

При гидротермальном сжижении МКВ образуются побочные продукты в виде водных растворов, не имеющих энергетической ценности и нуждающихся в утилизации. Экспериментально изучены способы их утилизации, а также биоремедиации сточных вод с помощью микроводорослей с последующим получением из выращенной биомассы биотоплива. Выращивание микроводорослей на сточных водах можно рассматривать как стрессовые условия, которые, с одной стороны, не дают значительного прироста биомассы, а с другой, — способны приводить к накоплению в биомассе МКВ биохимических соединений с повышенным содержанием углерода (липидов). Именно такой биохимический состав наиболее отвечает поставленной задаче. Для проведения исследований был сделан скрининг (выбор) МКВ из коллекции НИЛ ВИЭ, способных к эффективному росту на сточных водах, и их биоремедиации на основе последовательной лабораторной адаптационной селекции к росту на сточных водах и утилизации из них питательных веществ. Установлено, что из семи кандидатных штаммов МКВ две культуры наиболее эффективны в очистке сточных вод: *Chlorella ellipsoidea rsemsu Chl-el* и *A. platensis rsemsu P (Bios)*, представляющие устойчивый консорциум из клеток МКВ артроспира и гетеротрофных бактерий. Указанные культуры полностью потребляют из сточной воды фосфор в форме ортофосфатов и азот в форме аммония и нитратов. Выращенная на сточных водах влажная биомасса трансформирована в биотопливо технологией гидротермального сжижения, в результате получены: бионефть (45,7% от исходной биомассы), синтез-газ (17,5%) и биоуголь (26,0%), а также побочный водный раствор (10,8%), подлежащий утилизации. Экспериментально на основе метода лабораторной адаптационной селекции подобраны три штамма МКВ, способные в течение длительного времени (более месяца) расти на разбавленном побочном водном растворе после гидротермального сжижения. Таким образом, экспериментально доказана возможность утилизации питательных веществ микроводорослями из сточных вод и из побочного водного раствора после НТЛ для частичного замыкания по питательным веществам цикла производства бионефти. Предложено рассматривать полученный из биомассы технологией НТЛ биоуголь, на 90% состоящий из углерода, как еще одну альтернативную стратегию улавливания и хранения углерода [15, 16].

Один из возможных путей сокращения стоимости биотоплива из МКВ — одновременное получение из них ценных сопутствующих продуктов для химической, фармацевтической, медицинской, пищевой, кормовой промышленности. НИЛ ВИЭ предложено применение части выращенной биомассы в качестве биологически активных кормовых и пищевых добавок, а также белков [17 — 19].

Важным направлением исследований микроводорослей как сырья для получения биотоплива и сопутствующих продуктов стал многофакторный анализ территории для выделения регионов, по комплексу факторов пригодных для рентабельного культивирования МКВ. На основе собственных многолетних лабораторных и натуральных экспериментов, а также анализа литературных источников обоснованы пороговые значения климатических факторов для открытого культивирования МКВ (освещенность — не менее 4,0 кВт·ч/м²/сут, соотношение световой и темновой фазы — не менее, чем 6:18, температура окружающей среды — не ниже 15 °С). В качестве объекта культивирования взяты МКВ родов *Dunaliella* и *Arthrospira*. Путем пространственного анализа выявлены регионы РФ и СНГ, где возможно производство МКВ способом открытого культивирования в теплые периоды года (районы Ставропольского и Краснодарского краев, Ростовской, Астраханской областей, Республик Дагестан и Крым, ряд областей Республики Узбекистан) [20, 21].

В Республике Узбекистан вследствие высыхания Аральского моря, концентрация солей во многих оставшихся водоёмах Приаралья поднялась свыше 100 г/л, в них полностью изменился состав фито- и зоопланктона. В подобных водоёмах перспективна культивация МКВ *Dunaliella* в качестве корма для рачка артемии, который, в свою очередь, является ценным кормом для осетровых рыб. Для увеличения производства артемии необходимо строительство промышленных плантаций, в которых можно получать до 10 урожаев цист в год.

Заключение

В настоящее время биомасса микроводорослей рассматривается в качестве нового нетрадиционного источника возобновляемого непившего сырья для производства биотоплива третьего поколения. В НИЛ ВИЭ МГУ выполнен ряд исследований в этой области, развиты методы выделения кандидатных штаммов из природных источников, создана коллекция микроводорослей энергетического назначения. Обоснованы методы скрининга и индукции в кандидатных штаммах МКВ липидов и углеводов. Детально разработаны методы создания физиологического стресса для двухстадийного культивирования МКВ, когда на первом этапе роста микроводорослей в оптимальных условиях идет интенсивное накопление биомассы, а на втором — меняется ее биохимический состав и происходит синтез целевых продуктов под воздействием различного

вида стрессоров. В результате использования таких факторов стресса, как повышенная интенсивность освещения, голодание по азоту и фосфору, увеличение содержание CO_2 в газовой смеси, подаваемой в культиваторы, получены значимое увеличение содержания липидов и углеводов и снижение содержания белка в биомассе микроводорослей.

Современными технологиями конверсии выращенная биомасса различных штаммов МКВ была преобразована в широкую линейку биотоплив: метан, водород, биобутанол, биоэтанол, биодизель, бионефть, биобензин, синтез-газ и биоуголь. Подробно изучена

технология гидротермального сжижения МКВ с утилизацией побочных продуктов для повышения эффективности получения биотоплива.

Предложено оценивать ресурсный потенциал производства бионефти из МКВ как годовую продуктивность биомассы в заданных климатических условиях при их открытом культивировании, а также как количество получаемого из этой биомассы биотоплива. Определены районы регионов РФ и Республики Узбекистан, потенциально пригодные для культивирования МКВ и производства сопутствующих продуктов с высокой добавленной стоимостью.

Литература

1. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel' O.S. Efficiency of the Biodiesel Production from Microalgae // Thermal Eng. 2014. V. 61. No. 6. Pp. 399—405.
2. Mathimani T., Pugazhendhi A. Utilization of Algae for Biofuel, Bio-products and Bio-Remediation // Biocatalysis and Agricultural Biotechnol. 2019. V. 17. Pp. 326—330.
3. Chi N. e. a. Evaluating the Potential of Green Alga *Chlorella* sp. for High Biomass and Lipid Production in Biodiesel Viewpoint // Ibid. Pp. 184—188.
4. Yang J. e. a. Life-cycle Analysis on Biodiesel Production from Microalgae: Water Footprint and Nutrients Balance // Bioresource Technol. 2011. V. 102(1). Pp. 159—165.
5. Muller E.E.L. e. a. Lipid-based Biofuel Production from Wastewater // Current Opinion in Biotechnol. 2014. V. 30. Pp. 9—16.
6. Чернова Н.И. Технологии производства моторных топлив из нетрадиционного сырья на основе микробной биомассы // Энергетик. 2018. № 10. С. 39—44.
7. Hielmann S.M. e. a. Hydrothermal Carbonization of Microalgae // Biomass and Bioenergy, 2010. V. 34. Pp. 875—882.
8. Алексеев В.В. и др. Энергетические плантации // География, общество, окружающая среда. Т. 3. Природные ресурсы их использование и охрана. М.: Издат. дом «Городец», 2004. С. 578—607.
9. Chernova N.I., Kiseleva S.V. Microalgae Biofuels: Induction of Lipid Synthesis for Biodiesel Production and Biomass Residues in to Hydrogen Conversion // Intern. J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. No. 5. Pp. 2861—2867.
10. Пат. № 2539766 РФ. Штамм *Arthrospira platensis* T/05-117-продуцент липидосодержащей биомассы / Чернова Н.И. и др. // Бюл. изобрет. 2015. № 3.
11. Raslavičius L. e. a. Producing Transportation Fuels from Algae: in Search of Synergy // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2014. V. 40. Pp. 133—142.
12. Chernova N.I. e. a. Manufacturing Gaseous Products by Pyrolysis of Microalgal Biomass // Intern. J. Hydrogen Energy. 2020. V. 45. No. 3. Pp. 1569—1577.
13. Vlaskin. M.S. e. a. Influence of Solvent on the Yield and Chemical Composition Of Liquid Products of Hydrothermal Liquefaction of *Arthrospira Platensis* as

References

1. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel' O.S. Efficiency of the Biodiesel Production from Microalgae. Thermal Eng. 2014;61;6:399—405.
2. Mathimani T., Pugazhendhi A. Utilization of Algae for Biofuel, Bio-products and Bio-Remediation. Biocatalysis and Agricultural Biotechnol. 2019;17:326—330.
3. Chi N. e. a. Evaluating the Potential of Green Alga *Chlorella* sp. for High Biomass and Lipid Production in Biodiesel Viewpoint. Ibid:184—188.
4. Yang J. e. a. Life-cycle Analysis on Biodiesel Production from Microalgae: Water Footprint and Nutrients Balance. Bioresource Technol. 2011;102(1):159—165.
5. Muller E.E.L. e. a. Lipid-based Biofuel Production from Wastewater. Current Opinion in Biotechnol. 2014;30:9—16.
6. Chernova N.I. Tekhnologii Proizvodstva Motornykh Topliv iz Netraditsionnogo Syr'ya na Osnove Mikrobnoy Biomassy. Energetik. 2018;10:39—44. (in Russian).
7. Hielmann S.M. e. a. Hydrothermal Carbonization of Microalgae. Biomass and Bioenergy, 2010;34:875—882.
8. Alekseev V.V. i dr. Energeticheskie Plantatsii. Geografiya, Obshchestvo, Okruzhayushchaya Sreda. T. 3. Prirodnye Resursy Ikh Ispol'zovanie i Okhrana. M.: Izdat. Dom «Gorodets», 2004;578—607. (in Russian).
9. Chernova N.I., Kiseleva S.V. Microalgae Biofuels: Induction of Lipid Synthesis for Biodiesel Production and Biomass Residues in to Hydrogen Conversion. Intern. J. Hydrogen Energy. 2017;42;5:2861—2867.
10. Pat. № 2539766 RF. Shtamm *Arthrospira Platensis* T/05-117-Produtsent Lipidosoderzhashchey Biomassy. Chernova N.I. i dr. Byul. Izobret. 2015. № 3. (in Russian).
11. Raslavičius L. e. a. Producing Transportation Fuels from Algae: in Search of Synergy. Renewable and Sustainable Energy Rev. 2014;40:133—142.
12. Chernova N.I. e. a. Manufacturing Gaseous Products by Pyrolysis of Microalgal Biomass. Intern. J. Hydrogen Energy. 2020;45;3:1569—1577.
13. Vlaskin. M.S. e. a. Influence of Solvent on the Yield and Chemical Composition Of Liquid Products of Hydrothermal Liquefaction of *Arthrospira Platensis* as

Revealed by Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry // *European J. Mass Spectrometry*. 2018. V. 24. No. 4. Pp. 363—364.

14. **Vlaskin M.S. e. a.** Chemical Composition of Bio-oil Produced by Hydrothermal Liquefaction of Microalgae with Different Lipid Content // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci.* 2018. V. 159. No. 1. Pp. 12004(1)—012004(6).

15. **Chernova N.I. e. a.** Hydrothermal Liquefaction of Microalgae for Biofuel Production: the Recycling of Nutrients from an Aqueous Solution after HTL // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2019. No. 564. Pp. 012101—1—012101—6.

16. **Chernova N.I., Kiseleva S.V.** The Wastewater Using in Technologies of Bio-oil Production from Microalgae: CO₂ Capture and Storage // *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2021. V. 1037. No. 11. P. 012045.

17. **Пат. № 2034499 РФ.** Способ приготовления премикса для сельскохозяйственной птицы / Околелова Т.М. и др. // *Бюл. изобрет.* 1995. № 3.

18. **Пат. № 2137402 РФ.** Пищевая добавка / Зайцев С.И. и др. // *Бюл. изобрет.* 1999. № 26.

19. **Пат. № 2322489 РФ.** Штамм *Arthrospira platensis* (Nordst.) Geitl. 1/02-T/03-5 — продуцент белковой биомассы / Коробкова Т.П. и др. // *Бюл. изобрет.* 2008. № 11.

20. **Chernova N.I. e. a.** Estimation of Microalgae Resource Potential for Bio-oil production and Sustainable Rural Development in the Climatic Conditions of Russia (the Republic of Dagestan) // *Proc. MATEC Web Conf.* 2018. No. 178. Pp. 09011—1—09011—6.

21. **Чернова Н.И., Киселева С.В.** Ресурсный потенциал производства биотоплива и сопутствующих продуктов из микроводорослей применительно к Республике Узбекистан // *Сборник статей под ред. академика Р.А. Захидова.* Ташкент: Изд-во Ташкентского гос. техн. ун-та им. Ислама Каримова. 2021. Т. 1. С. 29.

Revealed by Fourier Transform Ion Cyclotron Resonance Mass Spectrometry. *European J. Mass Spectrometry*. 2018;24;4:363—364.

14. **Vlaskin M.S. e. a.** Chemical Composition of Bio-oil Produced by Hydrothermal Liquefaction of Microalgae with Different Lipid Content. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci.* 2018;159;1:12004(1)—012004(6).

15. **Chernova N.I. e. a.** Hydrothermal Liquefaction of Microalgae for Biofuel Production: the Recycling of Nutrients from an Aqueous Solution after HTL. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2019;564:012101—1—012101—6.

16. **Chernova N.I., Kiseleva S.V.** The Wastewater Using in Technologies of Bio-oil Production from Microalgae: CO₂ Capture and Storage. *IOP Conf. Series: Materials Sci. and Eng.* 2021;1037;11:012045.

17. **Pat. № 2034499 RF.** Sposob Prigotovleniya Premiksa dlya Sel'skokhozyaystvennoy Ptitsy. *Okolelova T.M. i dr.* *Byul. Izobret.* 1995. № 3. (in Russian).

18. **Pat. № 2137402 RF.** Pishchevaya Dobavka / Zaytsev S.I. i dr. *Byul. Izobret.* 1999. № 26. (in Russian).

19. **Pat. № 2322489 RF.** Shtamm *Arthrospira Platensis* (Nordst.) Geitl. 1/02-T/03-5 — *Produtsent Belkovoy Biomassy.* *Korobkova T.P. i dr.* *Byul. izobret.* 2008. № 11. (in Russian).

20. **Chernova N.I. e. a.** Estimation of Microalgae Resource Potential for Bio-oil production and Sustainable Rural Development in the Climatic Conditions of Russia (the Republic of Dagestan). *Proc. MATEC Web Conf.* 2018;178:09011—1—09011—6.

21. **Chernova N.I., Kiseleva S.V.** Resursnyy Potentsial Proizvodstva Biotopliva i Sopotstvuyushchikh Produktov iz Mikrovodorosley Primenitel'no k Respublike Uzbekistan. *Sbornik Statey pod Red. Akademika R.A. Zakhidova.* Tashkent: *Izd-vo Tashkentskogo Gos. Tekhn. Unta im. Islama Karimova.* 2021;1:29. (in Russian).

Сведения об авторах:

Чернова Надежда Ивановна — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: chernova_nadegda@mail.ru

Киселева Софья Валентиновна — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая научно-исследовательской лабораторией возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Information about authors:

Chernova Nadezhda I. — Ph.D. (Biolog.), Leading Researcher, Head of Research Laboratory of Renewable Energy Sources of Geographical Faculty, Lomonosov Moscow State University, e-mail: chernova_nadegda@mail.ru

Kiseleva Sofiya V. — Ph.D. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Head of Research Laboratory of Renewable Energy Sources of Geographical Faculty, Lomonosov Moscow State University, e-mail: k_sophia_v@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 02.02.2022

The article received to the editor: 02.02.2022