

БИОТОПЛИВО ИЗ ВОДОРОСЛЕЙ: ТЕХНОЛОГИИ, ПРОДУКТИВНОСТЬ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Кандидат биологических наук Н. И. ЧЕРНОВА,
кандидат физико-математических наук С. В. КИСЕЛЁВА
(МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет)

Микроводоросли как источник сырья для биоэнергетики. Среди возобновляемых источников энергии биомасса всегда находила наиболее широкое применение. В последние десятилетия наблюдается значительный и устойчивый рост масштабов применения биомассы в энергетике, расширение спектра способов её преобразования. Поэтому актуальной задачей стал поиск новых видов биомассы, новых технологий её переработки и – особенно – технологий комплексного использования. Из интересных и перспективных направлений назовём биотехнологии энергетического применения микроводорослей.

Традиционно водоросли относят к растениям. Микроводоросли (МКВ), как следует из названия, – это микроскопические фотосинтезирующие организмы, обитающие как в морских и пресноводных, так и в почвенных экосистемах. Однако в воде живут также водные семенные растения (ряска, элодея, рдест и др.), высшие споровые растения (мхи, папоротникообразные) и типичные водоросли. К первым двум группам растений применим термин “макрофиты”, то есть большие растения. К макрофитам относят и некоторые типичные водоросли (харовые, бурые, красные), а иногда и нитчатые водоросли больших размеров (колебания размеров составляют 1.5 см – 20 см – 60 м). Размеры микроводорослей колеблются от 1 мкм (некоторые диатомеи), что соизмеримо с бактериальными клетками. Наука о водорослях называется альгология или фикология, её рассматривают как самостоятельный раздел ботаники.

Водоросли – как группа организмов различного происхождения – объединены следующими признаками: наличие хлорофилла и фотоавтотрофного питания, обитание в водной среде или во влажных условиях (в почве, сырых местах и т. п.). У водорослей, кроме того, отсутствует чёткая диффе-

ренциация тела (называемого слоевищем, или талломом) на органы и выраженная проводящая система. Таллом бывает одноклеточным и многоклеточным. Некоторые водоросли способны к гетеротрофии (питанию готовой органикой), как осмотрфной (питание поверхностью клетки, например жгутиконосцы), так и путём заглатывания через клеточный рот (эвгленовые, динофитовые). Среди одноклеточных существуют колониальные формы, когда отдельные клетки тесно связаны между собой через плазмодесмы или погружены в общую слизь. С точки зрения систематики, к водорослям относят различное число (в зависимости от классификации) отделов эукариот, многие из которых не связаны общим происхождением. Кроме того, к водорослям часто причисляют синезелёные водоросли, или цианобактерии, являющиеся прокариотами.

Интерес к выращиванию микроводорослей и их использованию имеет давнюю историю. Некоторые области их применения, способы культивирования, возможности сокращения энергозатрат при выращивании были рассмотрены нами в публикациях журнала в 2005 г¹. В частности, мы писали о кормовых, пищевых, косметических и фармацевтических продуктах из микроводорослей. На слуху в то время была в основном синезелёная водоросль спирулина/артроспира. К 2010 г. мировое производство микроводорослей составляло уже более 10 000 т в год, основная масса которого приходилась на США, Китай, Индию, Японию, Германию, Австралию, Израиль и Тайвань. Спирулина

¹ Рустамов Н.А., Зайцев С.И., Чернова Н.И. Биомасса – источник энергии // Энергия: экономика, техника, экология. 2005. № 6; Чернова Н.И., Киселева С.В., Зайцев С.И. Удивительные микроводоросли // Энергия: экономика, техника, экология. 2005. № 11.

по-прежнему удерживает первенство, однако помимо неё и хлореллы список перспективных микроводорослей пополнили *Dunaliella salina*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Haematococcus pluvialis*, *Cryptocodinium cohnii*, *Shizochytrium* др., нашедшие применение в пищевом и кормовом производстве, косметике, фармацевтической промышленности и др.² В России имеются лишь единичные примеры полупромышленного культивирования микроводорослей и цианобактерий для производства биологически активных добавок к пище и кормам.

Возникновение интереса к микроводорослям как сырью для производства топлива связано с энергетическим кризисом 70-х годов XX века, хотя ещё в 50-е годы была показана принципиальная возможность выращивания микроводорослей в массовой культуре в производственных масштабах. Крупные промышленные установки были созданы в Германии, Японии, Чехословакии, СССР, Польше, Болгарии, Франции, Мексике и ряде других стран³. Несмотря на высокую научную результативность исследований, в 80-е – начале 90-х гг. стало очевидно, что применение микроводорослевых систем как источника биомассы для энергетических целей является малоэффективным в силу дороговизны по сравнению с ископаемыми видами топлива. Поэтому в тот период, как сказано выше, в области водорослевых технологий безусловное лидерство получили исследования, связанные с неэнергетическими приложениями.

Однако ситуация изменилась в конце 1990-х гг. в связи с востребованностью жидких моторных биотоплив, развитием биотехнологий, поисками новых сырьевых ресурсов для биоэнергетики и т.д. В настоящее время можно говорить об очередной серьёзной смене приоритетов в использовании водорослей: в последние два десятилетия значительно вырос объём научных исследований и количество осуществляемых проектов в области водорослевой биоэнергетики. Биоэнергетический потенциал водорослей привлекает огромное внима-

ние производителей биотоплива, инвестирующих значительные средства в исследовательские программы. И это не случайно: биомасса МКВ имеет ряд привлекательных свойств и удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к растительному энергетическому сырью:

- изъятие культивируемой биомассы микроводорослей для нужд энергетики не нарушает естественную консервацию органического вещества в биосфере; при этом плантации микроводорослей служат эффективным краткосрочным стоком антропогенного CO₂, конвертируя его в энергию высокой плотности;

- водоросли являются фотоавтотрофами: для их роста и развития нужен солнечный свет, CO₂ и вода с небольшим количеством минеральных солей;

- продуктивность микроводорослей по биомассе и маслу на порядки превышает продуктивность наземных, в том числе масличных растений (табл. 1, 2);

- для выращивания водорослей не нужны пахотные земли, плантации можно размещать на поверхности водоёмов или на непригодных для земледелия почвах (засолённых, пустынных и др.), причём площадь выращивания микроводорослей значительно меньше – по сравнению, например, с канолой (рапсом) в 20–100 раз (табл. 1);

- водоросли требуют намного меньше воды, чем традиционные зерновые культуры, их можно выращивать и в солёной воде, и на сточных водах, ослабляя давление на ресурсы чистой воды;

- один из возможных путей сокращения стоимости биотоплива из микроводорослей – одновременное получение из них ценных сопутствующих продуктов для химической, фармацевтической, медицинской, пищевой и кормовой промышленности (бета-каротин, астаксантин, фикоцианин, хлорофилл, глицерин и т.д.), а также использование при их культивировании отходов других производств;

- при существующих в мире технологиях становится возможным крупномасштабное выращивание биомассы микроводорослей круглогодично не только в условиях тропического и субтропического климата, но и в умеренных климатических условиях, даже при отрицательных зимних температурах;

- микроводоросли не являются традиционным пищевым и кормовым сырьём;

- биоразнообразия микроводорослей (известно более 40 000 видов, из которых лишь несколько процентов находится в коллекциях живых культур, и только у нескольких сотен штаммов определён биохимический состав).

² Brennan L., Owende Ph. *Biofuels from microalgae – a review of technologies for production, processing and extraction of biofuels and co-products* // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, V. 14, P. 557–577.

³ Пиневиц В.В., Верзилин Н.Н., Михайлов А.А. *Изучение Spirulina platensis – нового объекта для высокоинтенсивного культивирования* // *Физиология растений*, 1970. Т. 17, Вып. 5, С. 1037–1046; Goldman J.C. *Outdoor algal mass cultures. Applications* // *Water Res.*, 1979, V.13, № 1, P. 1–19.

Таблица 1

Продуктивность некоторых перспективных видов водорослей (показаны значения продуктивности, полученные в конкретных условиях эксперимента)

Виды водорослей	<i>Scenedesmus dimorphus</i>	<i>Pyrenesium parvum</i>	<i>Euglena gracilis</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Dunaliella salina</i>	<i>Haematococcus pluvialis</i>	<i>Tetraselmis suecica</i>	<i>Isochrysis galbana</i>	<i>Nannochloropsis sp.</i>	<i>Stichococcus sp.</i>	<i>Botryococcus braunii</i>
Содержание липидов, %	16–40	22–38	14–20	4–22	6–44	5–45	20–30	22–38	33–38	40–59	до 80

Таблица 2

Сравнение рапса и микроводоросли *Haematococcus pluvialis* как энергоисточников

Культура	Продуктивность биомассы, т/га/год	Энергосодержание общее, ГДж/га/год	Продуктивность по маслу, т/га/год	Энергосодержание по маслу, ГДж/га/год	Площадь, необходимая для производства 300 · 10 ¹⁸ Дж/год энергии, Га
Рапс (Германия, семена)	3.1	75.6	1.2	44.7	6.7
Рапс (Финляндия, семена)	1.6	39.0	0.65	24.2	12.4
Озимый рапс (Россия, семена)	1.0–2.5	24.0–61.0	0.3–0.75	11.1–28.0	10.7–20.7
<i>Haematococcus pluvialis</i> (в среднем)	38.2	763	13.8	422	0.71
<i>Haematococcus pluvialis</i> (максимально)	91.8	1836	33.2	1014	0.3

Источники: Huntley M., Redalje D. CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2007. Vol. 12. P. 573–608; Чернова Н.И., Киселева С.В., Коробкова Т.П., Зайцев С.И. Микроводоросли в качестве сырья для получения биотоплива // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 9.

мический состав, продукционные и иные характеристики) даёт практически неисчерпаемый источник для селекционной работы, генных исследований и обеспечивает возможность получения высокоэнергетических культур.

В связи с последним обстоятельством следует заметить, что микроводоросли в полной мере способствуют преодолению обозначившегося в 2005–2008 гг. конфликта в природопользовании, связанного с широким использованием зерновых и масличных культур (пшеницы, кукурузы, рапса, ка-

нолы, сои, ятрофы, масличных пальм) для производства биэтанола и биодизеля (так называемое биотопливо первого поколения). Это вызвало негативное отношение к биоэнергетике как к масштабному потребителю пищевых ресурсов⁴, но и послужило

⁴ По данным ФАО ООН рост цен на продовольствие в этот период скорее был вызван ростом цен на энергоносители и резким увеличением спроса на продовольствие в странах Юго-Восточной Азии. Так, в дальнейшем, в период 2008–2009 гг., цены на зерно падали синхронно с ценами на нефть, несмотря на стремительный подъём мирового производства биотоплива.

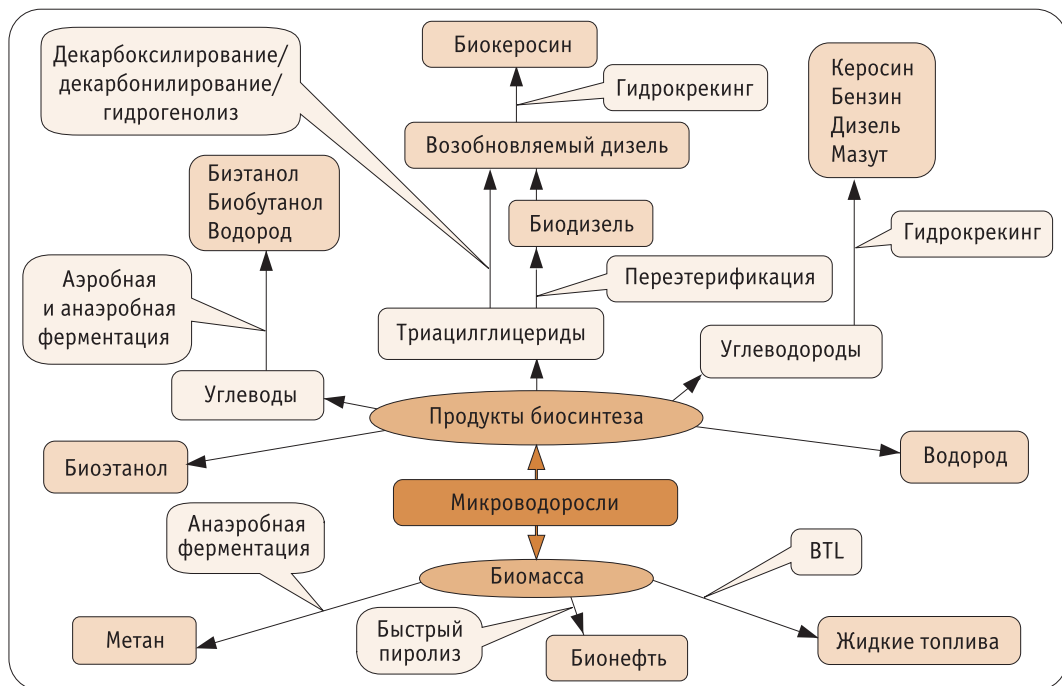


Рис. 1.
Современные технологии переработки микроводорослей в энергетические продукты.

стимулом к разработке технологий получения биотоплива из непищевого сырья и отходов (биотопливо второго поколения), представленных прежде всего лигноцеллюлозой. Кроме того Европейский Союз принял поправки в нормативы на биотопливо, увеличив обязательную его долю из непищевого сырья. В терминологическом плане это привело к выделению *биотоплива третьего поколения* (топливо, производимое из специально выращиваемых для энергетических целей водорослей) и *биотоплива четвертого поколения* (из генетически модифицированных водорослей – продуцентов углеводов, конвертирующих CO_2 непосредственно в топливо).

Поиски новых видов сырья для биоэнергетики – в том числе высокоэнергетических видов МКВ – будут актуальными и в дальнейшем, поскольку доля моторных топлив в структуре мирового топливно-энергетического баланса (порядка 35% в 2008 г.) остаётся стабильно высокой.

Технологии преобразования водорослей в энергоносители. С водорослями прежде всего связывают производство биодизеля переэтерификацией содержащихся в них триацилглицеридов (ТАГ) жирных карбоновых кислот. Реакция переэтерификации идёт между низкомолекулярными спиртами (метанол, этанол) и жирными кислотами в присутствии щелочных или кислотных катализаторов. В результате образуется биодизель, который по своему химическому составу не имеет ничего общего с дизелем из нефти, однако по физико-химическим характеристикам близок к дизельному топливу ГОСТ 305-81 Л/З или даже превосходит его. Основной объём мирового производства биодизеля получают из растительных масел (рапсового, соевого, пальмового, подсолнечного, кукурузного, горчичного и др.). Кислотный состав микроводорослей близок к растительным маслам традиционных масличных культур и определяется условиями их выращивания. Так например, в состав водорослей *Desmodesmus sp.* из беломорского гидроида входят в основном мононенасыщенные олеиновая (C18:1, 50–60%), пальмитолеиновая (C16:1, 0–15%) и насыщенная пальмитиновая (C16:0, 25–30%) кислоты; полиненасыщенные линолевая (C18:2) и линоленовая (C18:3) кислоты содер-

жаты в незначительных (менее 10%) количествах⁵.

Разработка новых подходов к переработке исходного водорослевого сырья позволяет ныне из одной и той же биомассы получать различные виды топлива. При определённых условиях культивирования микроводоросли (как селекционные, так и генно-модифицированные штаммы) способны синтезировать биоэтанол и водород⁶. Ряд микроводорослей синтезируют в процессе роста углеводороды. Так, зелёные одноклеточные колониальные водоросли *Botryococcus braunii* обладают замечательной способностью образовывать и аккумулировать жидкие углеводороды (до 86% от веса сухой биомассы). Углеводороды, экстрагируемые из биомассы *B. braunii*, можно рассматривать как источник транспортного топлива после гидрокрекинга. Например, продукт перегонки, полученный из водорослевой массы из *Darwin River Reservoir* (Австралия), содержит следующие фракции: бензин 67%, авиационное топливо 15%, дизельное топливо 15%, смазочное масло 3%⁷. К синтезированным водорослями ТАГ, а также к биодизелю, произведённому путём переэтерификации, применяют так называемый процесс гидротермального сжигания НТЛ (hydrothermal liquefaction), который проводится при повышенных давлении и температуре на гетерогенных катализаторах⁸. Затем гидрогенизацией и деоксигенацией (осуществляется в нефтехимии декарбосилированием, декарбонилированием или гидрогенолизом) получают возобновляемый дизель. Дополнительная операция гидрокрекинга, которой подвергается уже полученное топливо, позволяет повысить выход целевого продукта – биодизеля, содержащего углеводороды с короткими углеводородными цепочками (не

более 10 атомов углерода)⁹. Масштабный показательный проект получения топлива из микроводорослей для военно-морского флота и авиации осуществила с использованием данной технологической схемы компания Solazyme (Сан-Франциско, США) в 2008–2010 гг.¹⁰ В декабре 2013 г. министр ВМС США Рэй Мабус объявил о начале программы “Сельское хозяйство – флоту”, призванной обеспечить американские военно-морские силы топливом из семян зерновых культур, топленого жира и водорослей¹¹. Водоросли с высоким содержанием крахмала и углеводов можно переработать путём аэробной или анаэробной ферментации в биоэтанол, биобутанол и водород. Этанол из водорослей можно получать и одновременно с биодизельным топливом: после извлечения масла оставшаяся часть биомассы зачастую содержит достаточное количество крахмала и других углеводов.

Таким образом, в настоящее время можно говорить о существовании целого спектра технологий получения биотоплива третьего поколения из продуктов биосинтеза микроводорослей: биосинтез этанола и водорода, углеводов (с последующим спиртовым или ацетоно-бутиловым сбраживанием до биоэтанола и биобутанола), углеводородов (с последующим гидрокрекингом до керосина, бензина, дизеля, мазута и др.), триацилглицеридов (с получением переэтерификацией биодизеля, гидрогенизацией и деоксигенацией – возобновляемого, зелёного, дизеля¹² и дополнительно гидрокрекингом – биокеросина). При этом отходы переработки биомассы также могут служить сырьём для производства биотоплива – метана, водорода, бионефти, жидких биотоплив (рис. 1).

⁹ Raslavišius L., Semenov V.G., Chernova N.I., Keršys A., Kopeyka A.K. The promise and challenges of algae for transportation biofuels. In: Proceedings of the 17th International Conference Transport Means'2013. Kaunas, Lithuania: Technologija. 2013. p. 83–86; Trusov L.I., Gordienko A.A., Prokudina N.A. Advances of catalytic processing of a renewable high energy biomass towards liquid fuels and other valuable commodities // Problems of Modern Science and Education (e-journal), 2013. Доступно: <http://www.science-education.ru/108-a8728>.

¹⁰ Доступно: <http://solazyme.com/fuels>.

¹¹ Доступно: <http://www.flot.com/news/other/grease-fuel>.

¹² В настоящее время большое внимание уделяется получению из липидосодержащей биомассы возобновляемого дизеля (renewable diesel, green diesel) – топлива, близкого по составу к традиционному дизельному топливу из нефти.

⁵ Соловченко А.Е., Чивкунова О.Б., Семенова Л.П. и др. Влияние стрессов на содержание пигментов и жирных кислот липидов в клетках микроводоросли *Desmodesmus sp* из беломорского гидроида // Физиология растений. 2013. Т. 60. № 3. С. 1–10.

⁶ Deng M., Coleman J.R. Ethanol synthesis by genetic engineering in Cyanobacteria // Applied and Environmental Microbiology. 1999. Vol. 65, № 2. P. 523–528.

⁷ L.W. Hillen et al. Hydrocracking of the Oils of *Botryococcus braunii* to Transport Fuels // Biotechnology and Bioengineering. 1982. 24 (1): 193–205.

⁸ Y. Zhu, K.O. Albrecht, D.C. Elliott et. al. Development of hydrothermal liquefaction and upgrading technologies for lipid-extracted algae conversion to liquid fuels // Algal Research. 2 (2013). 455–464.

Таблица 3

Прогноз развития технологий получения биодизельного топлива из водорослей

Этапы развития технологии	Процесс	Продукт	
		Название (коммерческий продукт)	Химическое соединение
~ 1995	Переэтерификация	Биодизель (FAME – Fatty acid methyl esters)	Эфир
~ 2007	Гидрооблагораживание	Возобновляемый дизель (HVO RD – Hydrotreated Vegetable Oil Renewable Diesel)	C_nH_{2n+2}
~ 2015–2020	Гидротермическое сжижение; Газификация + Фишер–Тропш	Возобновляемый дизель (HTL bio-oil; FT-BTL)	C_nH_{2n+2}

Итак, если в 1995 г. основной технологией крупномасштабного производства биодизельного топлива была переэтерификация триацилглицеридов, то в середине 2000-х гг. начали развиваться технологии гидрооблагораживания (восстановление ненасыщенного соединения с присоединением атомов водорода по кратной связи) липидов и получаемого биодизеля до возобновляемого дизеля. Прогнозы дальнейшего развития показывают, что к 2015–2020 гг. лидирующими могут стать технологии гидротермического сжижения липидов и биодизеля (HTL), а также преобразование биомассы газификацией с последующим процессом Фишера–Тропша (табл. 3).

Проблемы получения биомассы микроводорослей. Использование микроводорослей для производства энергоносителей ставит задачу не только крупномасштабного культивирования, но и культивирования биомассы с заданными свойствами, например, с высоким содержанием липидов, углеводов, углеводородов и т.д. Однако внедрение перспективных штаммов-продуцентов липидов в производство биотоплив осложняется следующим известным обстоятельством: одновременное достижение высокой продуктивности по биомассе и по липидам при выращивании МКВ невозможно. Интенсивный рост биомассы микроводорослей идёт в оптимальных для них условиях, а индукция биосинтеза и аккумуляции липидов может быть достигнута путём создания физиологического стресса (например, лимитирование или голодание по азоту и/или фосфору; максимальные или минимальные значения интенсивности светового потока, pH, температуры; облучение

ультрафиолетом; воздействие тяжёлых металлов и других химических веществ; осмотический стресс и др.). Поэтому одним из возможных путей максимального накопления биомассы МКВ с оптимальным содержанием липидов является проведение культивирования в две стадии¹³. Первая стадия включает в себя максимальное получение биомассы в оптимальных условиях роста. На второй стадии культивирования полученная биомасса микроводорослей переводится в стрессовые условия для индукции синтеза и аккумуляции липидов. Но в водорослевой индустрии нужны промышленные культуры МКВ, которые быстро растут, синтезируют и аккумулируют значительные количества липидов в виде триацилглицеридов и жидких углеводов.

К настоящему времени созданы коллекции микроорганизмов, в том числе микроскопических водорослей, в разных странах мира. Одна из крупнейших коллекций, коллекция UTEX, принадлежащая Техасскому университету (Остин, США), насчитывает более 3000 штаммов, а коллекция CCMF, собранная в Лаборатории океанологии им. Бигелоу (West Boothbay Harbor, штат Мэн, США), содержит около 2600 штаммов микроводорослей и цианобактерий. В коллекции морских микроорганизмов ICMAN-CSIC, располагающейся в Андалузском институте океанологии (Андалузия, Испания), около 300 штаммов микроводорослей, а

¹³ N.I. Chernova, T.P. Korobkova and S.V. Kiseleva. Use of Biomass for producing liquid Fuel: Current State and Innovation // Thermal Engineering, 2010. Vol. 57. No. 11. P. 937–945.

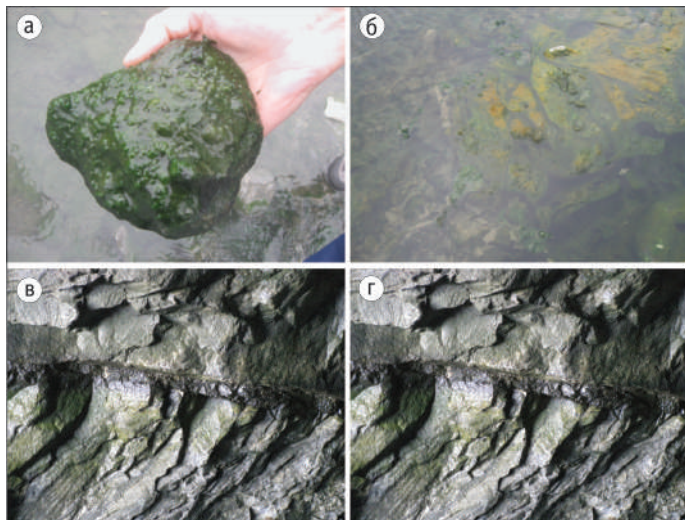


Рис. 2.
Образцы штаммов микроводорослей для исследования, собранные в различных регионах экспедиционных работ:
а – обрастание камня микроводорослями; б – циано-бактериальные маты на поверхности термальных Малкинских источников (Камчатка); в, г – обрастание скальных пород микроводорослями (Горный парк “Рускеала”, Республика Карелия).

одна из самых крупных коллекций водорослей и простейших микроорганизмов ССАР, находящаяся в Шотландском институте моря (Обан, Шотландия), включает в себя более 2500 штаммов, в том числе микроводорослей и цианобактерий.

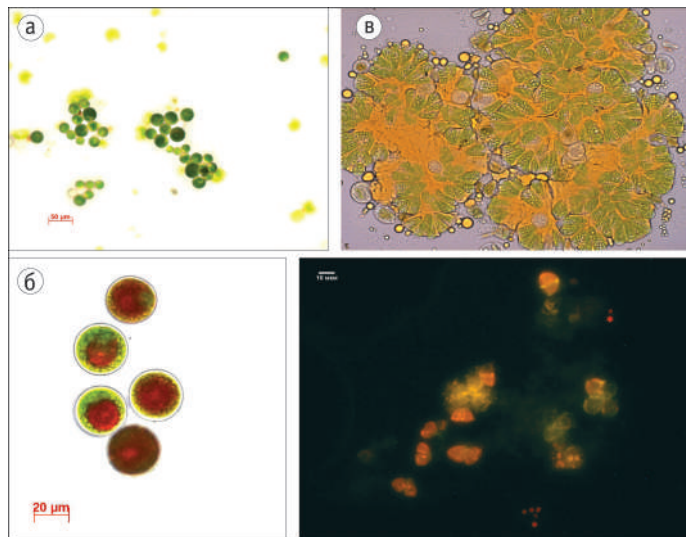
Интересным примером коллекции микроводорослей, используемых в качестве потенциальных источников липидов, выделенных из пресных и солёных водоёмов, является открытая и доступная для исследователей коллекция SERI/NREL (Solar Energy Research Institute/ National Renewable Energy Laboratory, US). Она была создана в рамках программы Aquatic Species Programm (ASP), направленной на получение масла из водорос-

лей, и передана в Гавайский университет (США). По некоторым данным, напротив, после завершения в 1996 г. 18-летней программы ASP в связи с неконкурентоспособностью полученного водорослевого биотоплива, тысячи исследованных штаммов коллекции были потеряны¹⁴.

Наиболее крупная российская коллекция микроводорослей, собранная в Институте физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, насчитывает около 300 штаммов микроводорослей и цианобактерий. Музей живых культур микроорганизмов Санкт-Петербургского госу-

¹⁴ Д. Биелло. Биотопливо: призрачные надежды // В мире науки. 2011. № 10.

Рис. 3.
Экспериментальные модули фотобиореактора НИЛ ВИЭ:
а – открытые плоскостные культиваторы; б – культиваторы со светодиодной системой освещения; в – закрытые ФБР с подачей углекислого газа; г – культивирование микроводорослей в стрессовых по освещенности условиях.



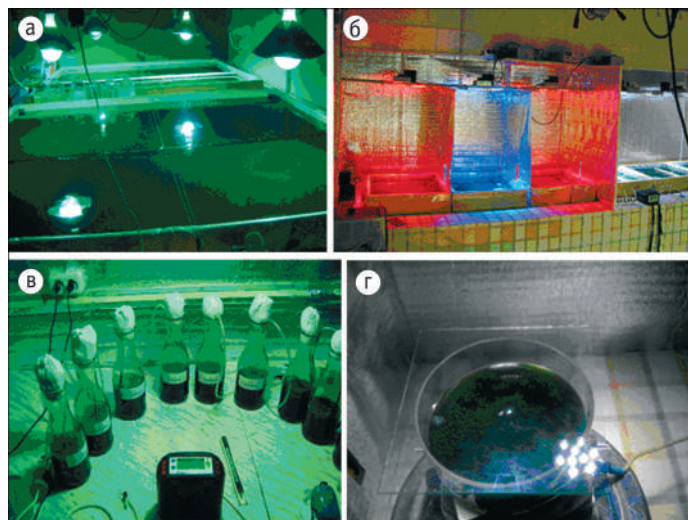


Рис. 4.
Примеры штаммов микроводорослей из коллекции НИЛ ВИЭ МГУ:
 – *Haematococcus pluvialis* rsemsu Нр-1/11: а – посевная культура; б – в стадии образования масла и астаксантина;
 – *Botryococcus braunii* rsemsu (видны капельки масла): в – в световом микроскопе; г – в люминесцентном микроскопе (культура, окрашенная Нильским красным).

дарственного университета (коллекция CALU) содержит 287 штаммов цианобактерий и 396 штаммов пресноводных и почвенных водорослей. Однако российские коллекции не ориентированы на штаммы, перспективные для целей энергетики, и – тем более – для производства жидких биотоплив. Таким образом, создание коллекций промышленных штаммов энергетического назначения, в том числе толерантных к выращиванию при низких температурах, а также разработка эффективных систем их культивирования, безусловно, актуальны.

С этой целью различными научными группами (биологический и географический факультеты МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт цитологии и генетики и Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН и др.) проводится поиск и выделение из природных источников штаммов микроводорослей – в первую очередь продуцентов липидов. Перечень регионов наших экспедиционных работ достаточно широк: от Карелии до Камчатки. Так, авторы участвовали в экспедиционных работах в Карелии,

привлекательность которой в рамках поставленной задачи определяется хорошо развитой гидрографической сетью, относящейся к бассейнам Белого (57%) и Балтийского морей (43%). Существенным аргументом при выборе района было видовое разнообразие диатомовых и зелёных водорослей, поскольку оба типа преобладают в списке продуцентов липидов. Работы проводились в нескольких районах республики Карелия, преимущественно в южной, юго-восточной и юго-западной её части. Было обследовано 19 озёр и 3 минеральных источника.

Камчатка, характеризующаяся исключительными природными факторами (экстремальные климатические условия; выходы термальных источников; вулканическая деятельность, изолированность от материка, определяющая возможность существования эндемичных видов и т.д.), – тоже весьма продуктивный регион для такого рода исследований. Для дальнейшей работы нами были собраны образцы из озёр на Камчатке близ Петропавловска-Камчатского, Елизово, поселков Термальный, Паратунка, Малки; Начикинского озера, кальдеры вулкана Узон и др. (рис. 2).

Во всех отобранных пробах была выделена с использованием цитохимических методов окрашивания липидов в клетках судановыми красителями (Судан чёрный Б, Судан III) серия кандидатных липидосодержащих штаммов микроводорослей, идентифицированных нами до рода или вида. Для количественного определения липидов в отобранных штаммах микроводорослей необходимо вырастить некоторое количество биомассы нужного качества. Оптимальный способ выращивания, как уже отмечалось выше, – двухстадийное культивирование в фотобиореакторе (ФБР). Этот способ объединяет все преимущества закрытых и открытых культиваторов, не имея при этом их недостатков. ФБР закрытого типа позволяют стабильно выращивать те водоросли, которые не могут расти в открытых культиваторах, обеспечивая непрерывную поставку высококачественной биомассы. Помещение выращенной биомассы в открытые культиваторы с большой степенью инсоляции и в питательную среду, лимити-

рованную по азоту, позволяет создать так называемый физиологический стресс для МКВ, при котором почти прекращается их рост и в клетках аккумулируются липиды. Для работ по культивированию микроводорослей-продуцентов целевых продуктов в лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова был разработан и смонтирован такой экспериментальный модуль фотобиореактора со светодиодной системой освещения и контролируемой подачей углекислого газа (рис. 3).

Выращиваемые культуры оценивались по скорости роста и содержанию ТАГ на 1-й и 2-й стадиях выращивания. Содержание триацилглицеридов в полученной биомассе определяли на спектрофлуориметре (биомассу окрашивали селективным по отношению к нейтральным липидам флуоресцентным красителем Нильским красным). Анализ содержания ТАГ в биомассе показал, что из 15 исследованных штаммов положительную реакцию на стресс обнаружили 8 штаммов: *Chlorococcum sp. rsemsu Ccc-7/11* (с 25.2 до 35.2%); *Chlorella vulgaris rsemsu Chv-20/11* (с 21.0 до 33.0%); *Haematococcus pluvialis rsemsu Hp-1/11* (с 4.0 до 16.8%) и др., *Arthrospira platensis rsemsu 1/02-T* (с 36.1 до 47.1%) и *Chlamydomonas sp. rsemsu Chlam-15/11* (с 58.3 до 68.1% ТАГ). Причём последние две культуры могут быть кандидатами для получения биодизеля вследствие очень высокого содержания ТАГ в них. У двух штаммов содержание ТАГ не изменилось, а у пяти – снизилось (например, у *Chlorococcum schwartzii rsemsu Chcc-14/11-ПК* с 43.2 до 34.0%; *Chlorella sp. rsemsu Chl-1/11-B* с 31.1 до 22.5%), но осталось на достаточно высоком уровне. Таким образом, реакция на созданный стресс является видо- и штаммоспецифичной, и параметры стресса требуют подбора для разных культур. Выделенные культуры из природных источников были включены в коллекцию микроводорослей энергетического назначения лаборатории ВИЭ географического факультета МГУ (рис. 4).

Конечно, важно понимать, насколько востребованными в настоящее время могут быть результаты такого рода исследования в целом и для России в частности. Здесь важно отметить, что рентабельного процесса производства топлива из микроводорослей достигнуть не удалось ни в одном из проектов. Экономические оценки производства водорослевого биодизеля, выполненные исследователями Британской Колумбии, тоже дают достаточно пес-

симистичные результаты¹⁵. Они были сделаны как для открытых культиваторов, так и для закрытых фотобиореакторов. Рассматривалась круглогодичная и сезонная (с апреля по сентябрь) эксплуатация культиваторов (во втором случае двукратно снижались капитальные затраты и отсутствовала необходимость подогрева воды). Продуктивность по биомассе варьировалась в диапазоне от 10 до 25 г/м²/год с содержанием липидов в диапазоне от 15 (культиваторы) до 25–35% (биореакторы). Было установлено, что даже при самых высоких показателях продуктивности микроводорослей и содержания в них липидов ни один из методов их культивирования не привёл к паритетным по сравнению с ископаемым сырьём и топливом из наземных масличных растений (канола) затратам для сходных климатических условий. В итоге себестоимость 1 л водорослевого масла для открытых культиваторов оценивалась примерно в 2.5 долл./л, а для фотобиореакторов – около 7 долл./л. Улучшение экономических показателей производства биотоплива из водорослей может быть достигнуто в случае одновременного производства энергоносителей и особо ценных сопутствующих продуктов, перечень которых постоянно растёт, например, астаксантина, фикоцианина и фикоэритрина, β-каротина, хлорофилла, арахидоновой кислоты и смеси полиненасыщенных жирных кислот; пищевых и кормовых добавок, в том числе корма для дорогостоящих аквариумных рыб; функциональных продуктов, натуральных пищевых красителей, биополимеров, биопластика и т.д. Этот рынок продуктов из микроводорослей и цианобактерий уже в середине 2000-х гг. достигал около 7 млрд долл. Для России рентабельным энергетическим продуктом из микроводорослей могут стать биодобавки к бензину, которые позволят получить моторное топливо, соответствующее требованиям стандартов Евро 4, 5 и выше. Согласно некоторым оценкам, потребление бензина в России в 2016 г. может достигнуть 38 млн т/год, при этом дефицит составит 6 млн т.

¹⁵ Alabi A.O., Tampier M., Bibeau E. *Microalgae technologies for biofuels/bioenergy production in British Columbia: current Technology and Barriers to implementation. Final Report to the British Columbia Innovation Council. Seed Science. January, 14, 2009.*

Доступно: http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0901_Seed_Science_-_Microalgae_technologies_and_processes_for_biofuelsbioenergy_production_in_British_Columbia.pdf. 24.09.2010.