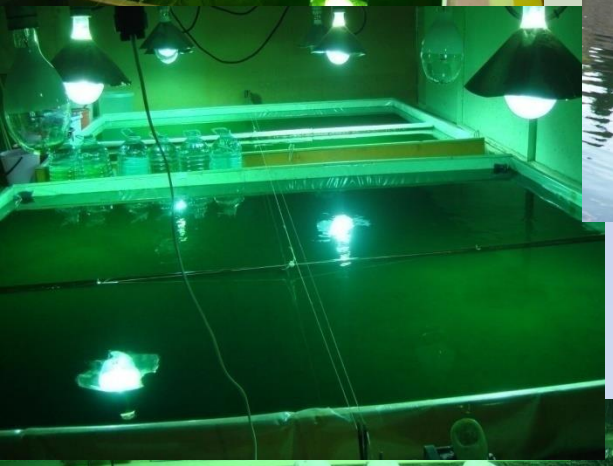
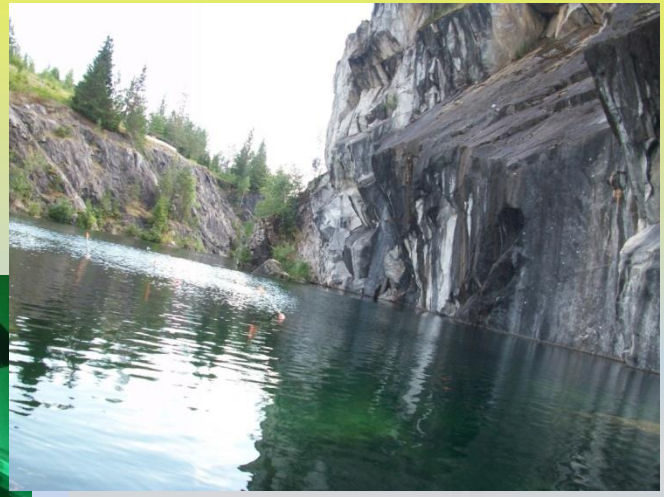
ОЦЕНКА ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ БИОТОПЛИВА ИЗ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

Н.И. Чернова, С.В. Киселева

НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

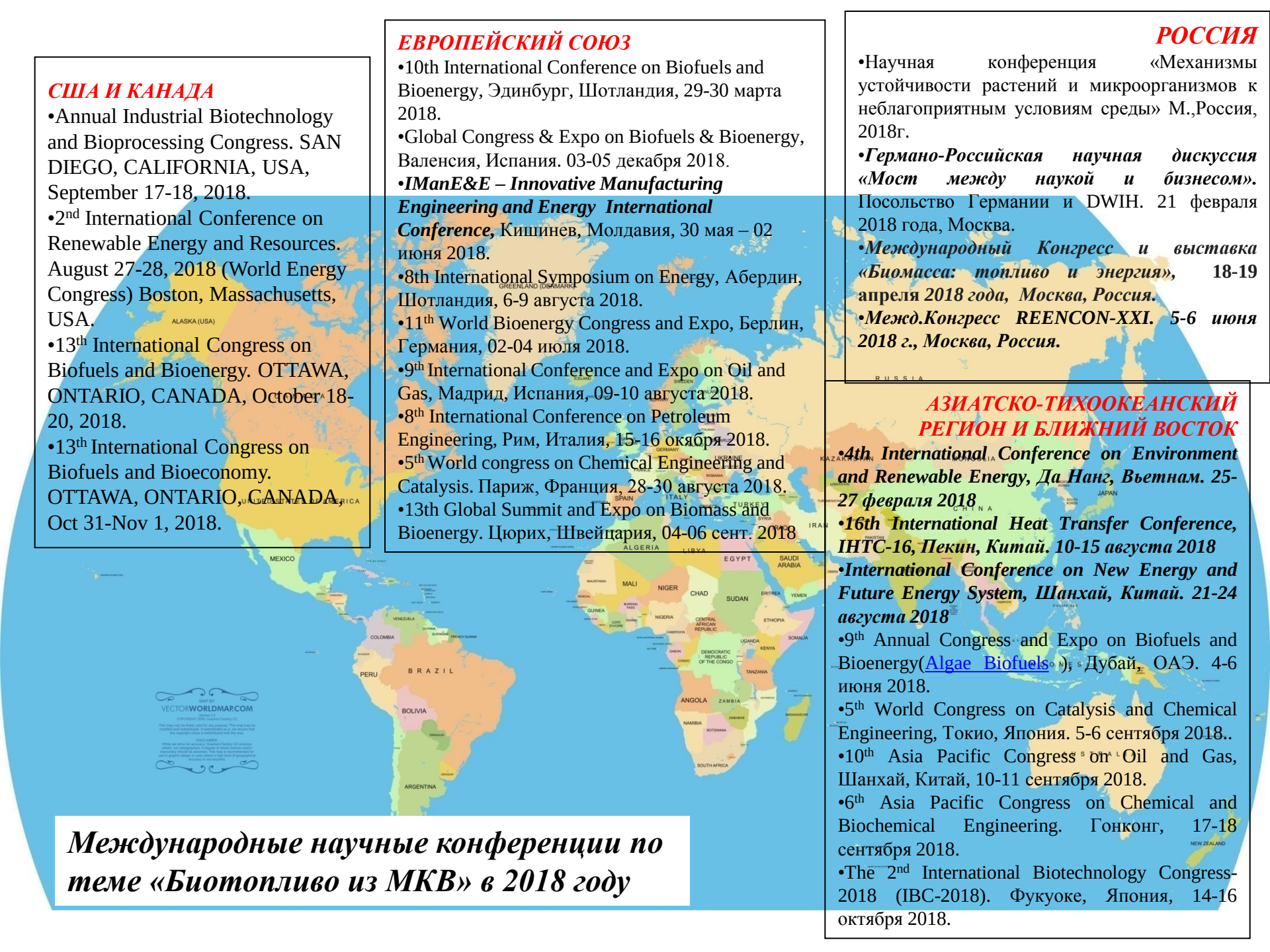




Микроводоросли- нетрадиционное возобновляемое сырье для получения биотоплива III поколения

***Преимущества микроводорослей(МКВ)*:**

- **Микроводоросли *не являются традиционным пищевым и кормовым сырьем*.**
- **Водоросли являются фотоавтотрофами: *для их роста и развития нужен солнечный свет, CO_2, вода с небольшим количеством минеральных солей.***
- **Продуктивность МКВ по биомассе и маслу на порядки превышает продуктивность наземных, в том числе масличных растений.**
- **Для выращивания водорослей *не требуются пахотные земли,* плантации можно размещать на поверхности водоемов или на непригодных для земледелия почвах.**
- **Водоросли требуют намного *меньше воды,* чем зерновые культуры. Их можно выращивать и в соленой воде, и на сточных водах, ослабляя давление на ресурсы чистой воды.**
- **Изъятие культивируемой биомассы микроводорослей для нужд энергетики не нарушает естественную консервацию органического вещества в биосфере, при этом плантации МКВ служат *эффективным краткосрочным стоком антропогенного CO_2,* конвертируя его в энергию высокой плотности.**
- **К важнейшим достоинствам топлива, вырабатываемого из МКВ, относится "CO_2-нейтральность" и меньшее количество выбросов в окружающую среду других загрязняющих веществ. При сжигании биотоплива из МКВ в атмосферу выделяется на 98% меньше серосодержащих соединений и на 50% меньше твердых частиц, чем при сжигании топлива на основе нефти и газа.**
- **Одним из возможных путей сокращения стоимости биотоплива из МКВ является *одновременное получение из них ценных сопутствующих продуктов* для химической, фармацевтической, медицинской, пищевой, кормовой промышленности (каротиноиды, бета-каротин, астаксантин, фикоцианин, хлорофилл, глицерин и т.д.) и использование при их культивировании отходов других производств.**



Международные научные конференции по теме «Биотопливо из МКВ» в 2018 году

США И КАНАДА

•Annual Industrial Biotechnology and Bioprocessing Congress. SAN DIEGO, CALIFORNIA, USA, September 17-18, 2018.

•2nd International Conference on Renewable Energy and Resources. August 27-28, 2018 (World Energy Congress) Boston, Massachusetts, USA.

•13th International Congress on Biofuels and Bioenergy. OTTAWA, ONTARIO, CANADA, October 18-20, 2018.

•13th International Congress on Biofuels and Bioeconomy. OTTAWA, ONTARIO, CANADA, Oct 31-Nov 1, 2018.

ЕВРОПЕЙСКИЙ СОЮЗ

•10th International Conference on Biofuels and Bioenergy, Эдинбург, Шотландия, 29-30 марта 2018.

•Global Congress & Expo on Biofuels & Bioenergy, Валенсия, Испания. 03-05 декабря 2018.

•***IManE&E – Innovative Manufacturing Engineering and Energy International Conference,*** Кишинев, Молдавия, 30 мая – 02 июня 2018.

•8th International Symposium on Energy, Абердин, Шотландия, 6-9 августа 2018.

•11th World Bioenergy Congress and Expo, Берлин, Германия, 02-04 июля 2018.

•9th International Conference and Expo on Oil and Gas, Мадрид, Испания, 09-10 августа 2018.

•8th International Conference on Petroleum Engineering, Рим, Италия, 15-16 октября 2018.

•5th World congress on Chemical Engineering and Catalysis. Париж, Франция. 28-30 августа 2018.

•13th Global Summit and Expo on Biomass and Bioenergy. Цюрих, Швейцария, 04-06 сент. 2018

РОССИЯ

•Научная конференция «Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды» М.,Россия, 2018г.

•***Германо-Российская научная дискуссия «Мост между наукой и бизнесом».*** Посольство Германии и DWIH. 21 февраля 2018 года, Москва.

•***Международный Конгресс и выставка «Биомасса: топливо и энергия», 18-19 апреля 2018 года, Москва, Россия.***

•***Межд.Конгресс REENCON-XXI. 5-6 июня 2018 г., Москва, Россия.***

АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКИЙ РЕГИОН И БЛИЖНИЙ ВОСТОК

•***4th International Conference on Environment and Renewable Energy, Да Нанг, Вьетнам. 25-27 февраля 2018***

•***16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16, Пекин, Китай. 10-15 августа 2018***

•***International Conference on New Energy and Future Energy System, Шанхай, Китай. 21-24 августа 2018***

•9th Annual Congress and Expo on Biofuels and Bioenergy(Algae Biofuels), Дубай, ОАЭ. 4-6 июня 2018.

•5th World Congress on Catalysis and Chemical Engineering, Токио, Япония. 5-6 сентября 2018..

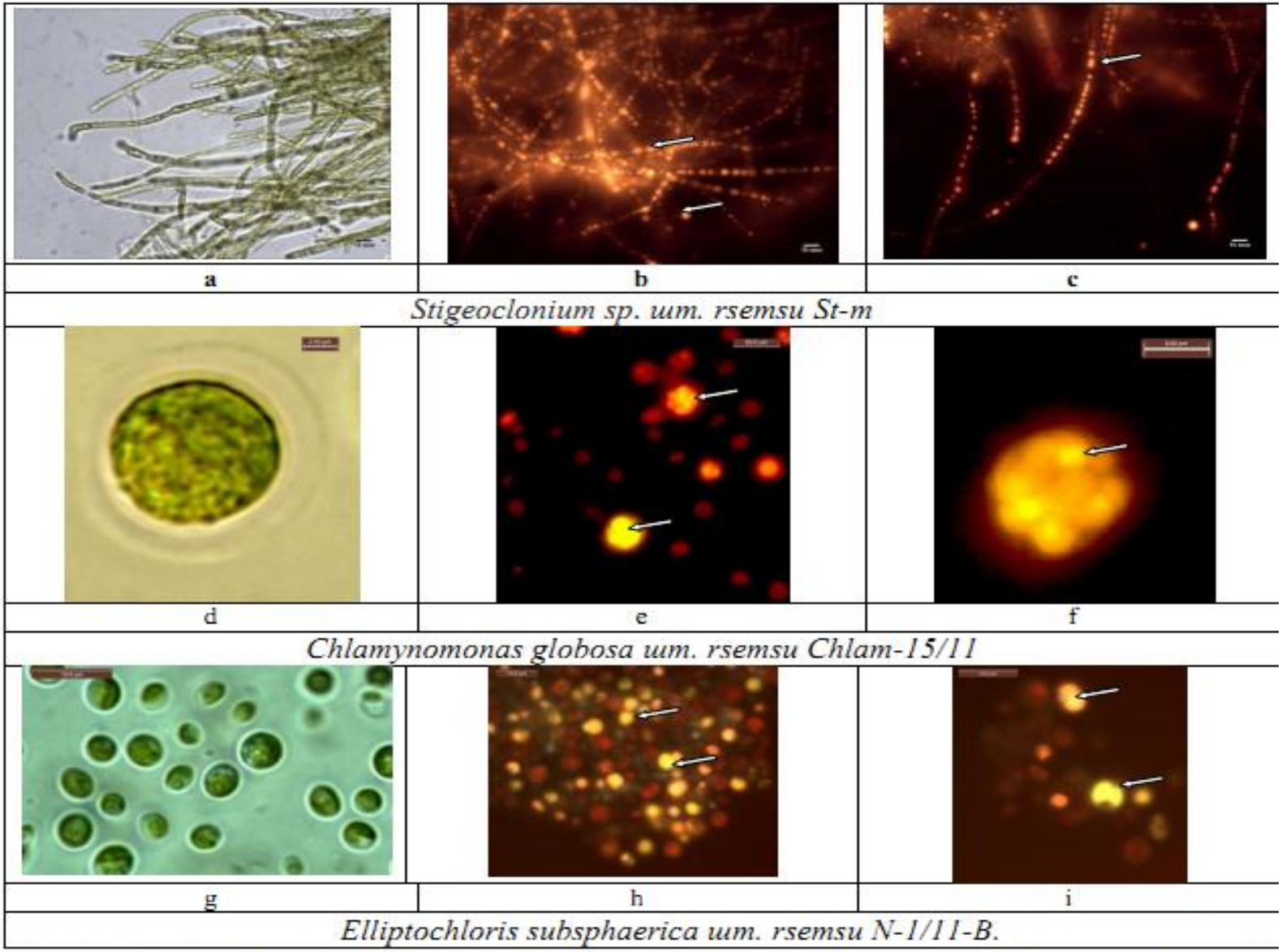
•10th Asia Pacific Congress on Oil and Gas, Шанхай, Китай, 10-11 сентября 2018.

•6th Asia Pacific Congress on Chemical and Biochemical Engineering. Гонконг, 17-18 сентября 2018.

•The 2nd International Biotechnology Congress-2018 (IBC-2018). Фукуоке, Япония, 14-16 октября 2018.

Некоторые направления работ в области исследования микроводорослей в НИЛ ВИЭ

Период	*Направления работ*	*Результаты*
В том числе с 1999-2008гг.	Применение спирулины в качестве **пищевых БАД.** *Получены Патенты на штамм Артроспиры как* продуцент белковой биомассы и способ получения пищевой добавки.	1) Патент RU № 2137402 «Пищевая добавка»// Б.И.20.09.1999. № 26. 2) Патент RU № 2322489 «Штамм Arthrospira platensis (Nordst.) Geitl. 1/02-Т/03-5 - продуцент белковой биомассы»// Б.И. 2008. №11.
2008-по наст. время	Биомасса МКВ для энергетических целей в качестве сырья **для производства биотоплива** 3-го поколения: •выделение из природной среды микроводорослей-продуцентов липидов и продуцентов энергетической биомассы. •первичный скрининг МКВ на основе цитохимического окрашивания суданами и флуоресцентным красителем Нильским красным; показана перспективность метода в альгологической практике при скрининге продуцентов липидов. •изучение влияния стрессоров на индукцию липидов в МКВ; ***•получение бионефти из МКВ методом гидротермального сжижения (HTL);*** ***•оценка ресурсного потенциала МКВ для производства биотоплива в климатических условиях России.***	1)Патент RU 2539766 «Штамм *Arthrospira platensis* Т/05-117-продуцент липидосодержащей биомассы», 2014. 2)Efficiency of the Biodiesel Production from Microalgae. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel' O.S.// *Thermal Engineering*, 2014. V. 61, № 6, P. 399-405. 3) Producing transportation fuels from algae: In search of synergy. L.Raslavičius, Semenov V., Chernova Nadezhda et al.// *J.Renewable & Sustainable Energy Rev.*, Elsevier BV (Netherlands), 2014.V. 40, P. 133-142. 4) Microalgae biofuels: Induction of lipid synthesis for biodiesel production and biomass residues into hydrogen conversion. Chernova N. I., Kiseleva S. V. // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, №. 5. P. 2861-2867. 5) Renewable energy technologies: enlargement of biofuels list and co-products from microalgae / N. I. Chernova, S. V. Kiseleva, M. S. Vlaskin, Y. Y. Rafikova //*MATEC Web of Conferences*,2017. no. 112. P. 1–6. 6) Hydrothermal liquefaction of microalgae to produce biofuels: State of the art and future prospects / M. S. Vlaskin, N. I. Chernova, S. V. Kiseleva et al. // *Thermal Engineering*, 2017. Vol. 64, №. 9. P. 627–636.



Окрашивание МКВ флуоресцентным красителем Нильским красным: (слева – исходная культура в световом микроскопе при увеличении х600 или х1000, в центре и справа – окрашенная культура в люминесцентном микроскопе после стресса при увеличении х600 и х1000). Стрелками на рисунке обозначены липидные глобулы желтого цвета, находящиеся внутри клеток.

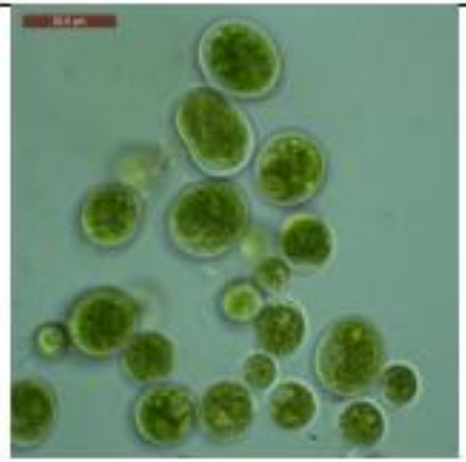
Продолжение рис.

j

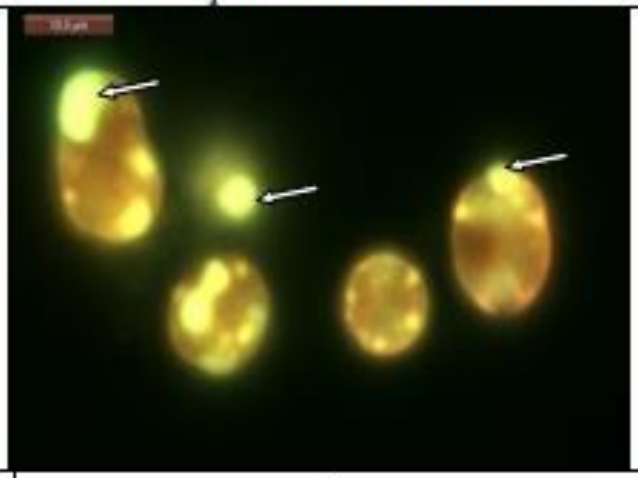
k

l

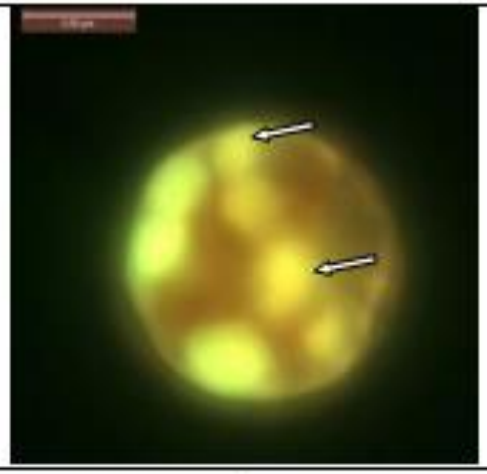
Geminella pulchra шт. rsemsu Pz-6



m



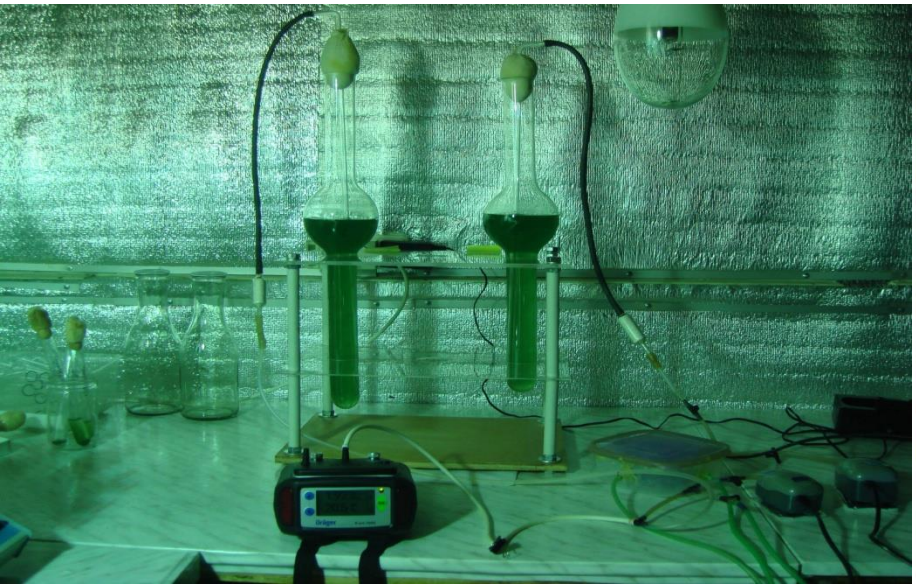
n

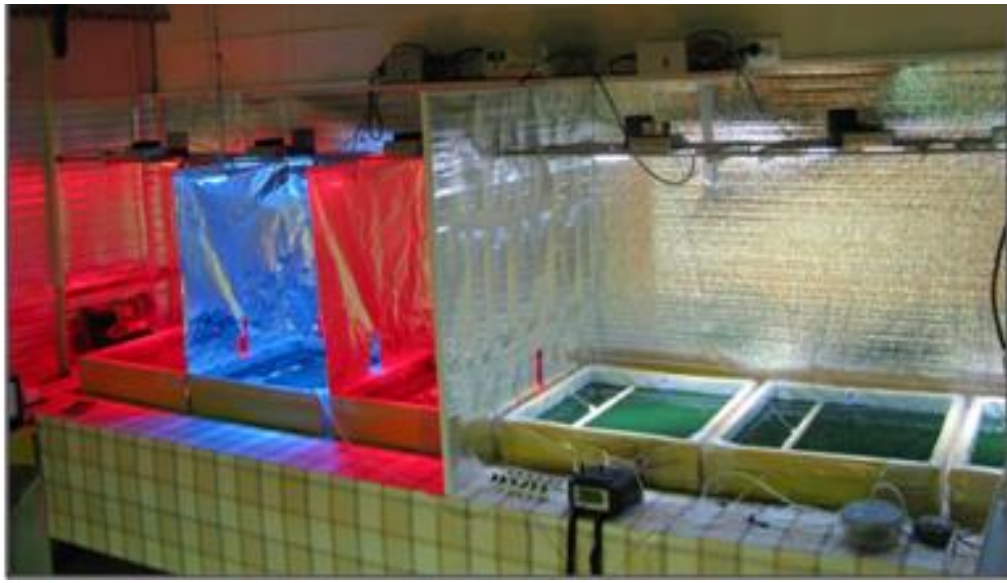


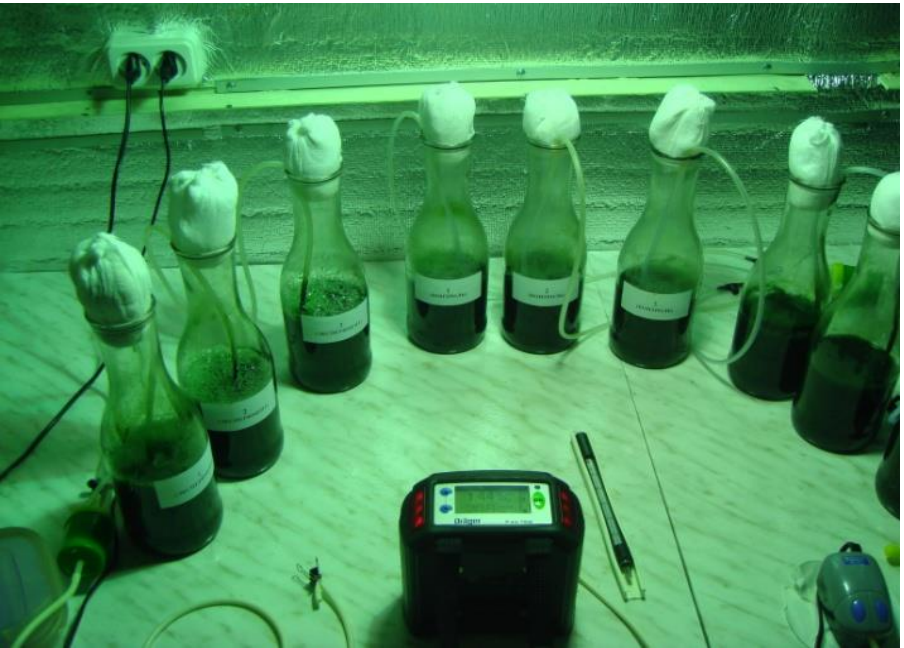
o

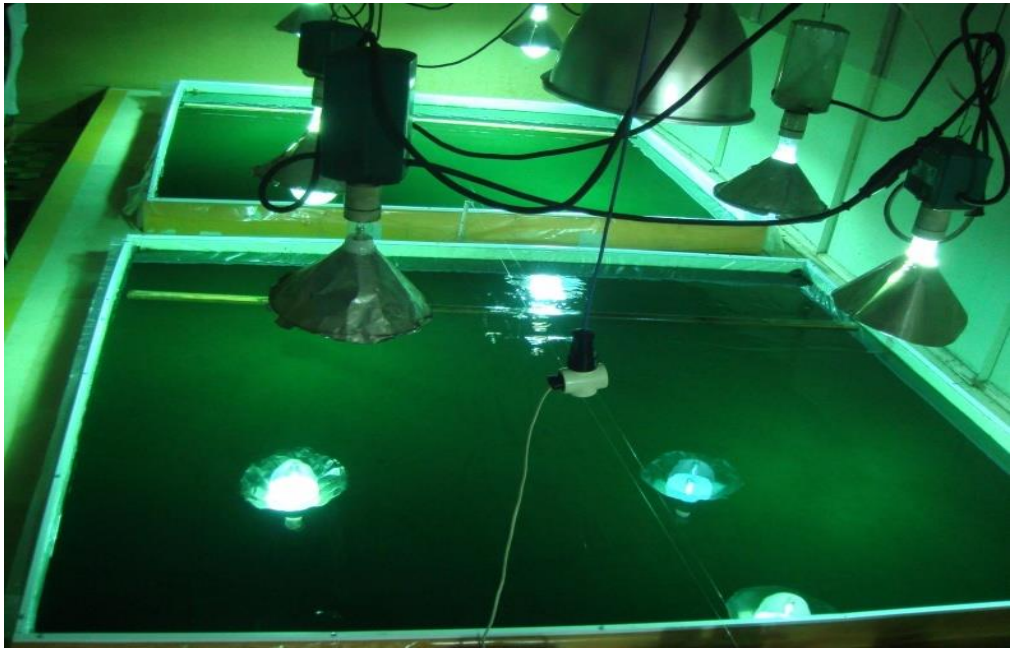
Chlamydopodium starrii шт. rsemsu Chcc-14/11

Установки для культивирования микроводорослей НИЛ ВИЭ: *закрытые фотобиореакторы (1л); малые открытые культиваторы (20-30 л); большие открытые культиваторы (500 л).*

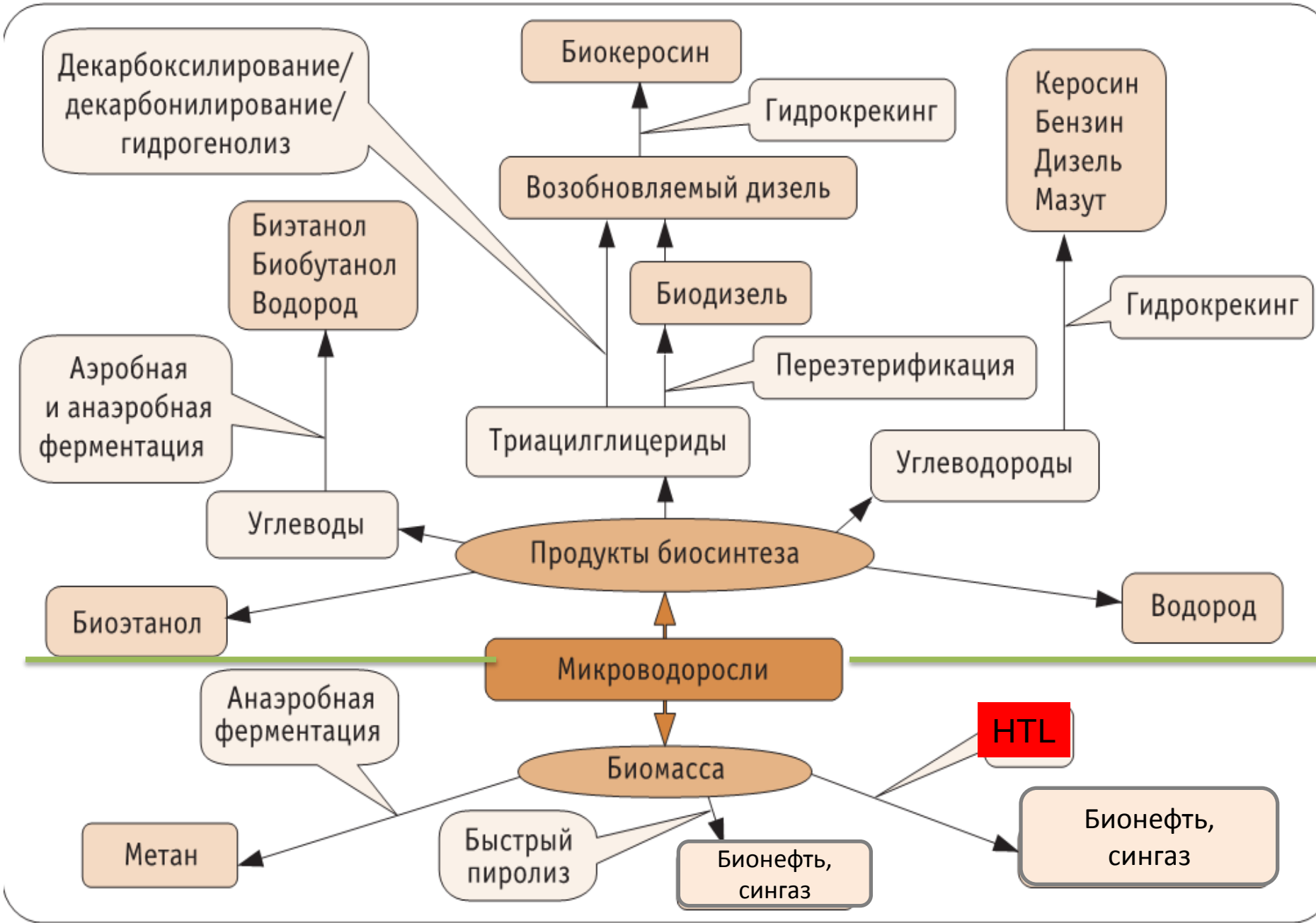








Современные технологии переработки микроводорослей в транспортные топлива



Теоретические оценки максимальной продуктивности МКВ и энергоэффективности преобразования солнечной энергии

При анализе возможностей использования фотосинтезирующих МКВ как источника сырья для биотоплива возникают следующие вопросы:

- возможны ли в принципе те высокие урожайности, которые анонсируются различными авторами и определяют перспективность МКВ как источника топлива в промышленных масштабах;
- каково соотношение энергетических затрат на производство липидов (масла) и энергии полученного продукта.

Оценим эффективность преобразования энергии света в энергию химических связей (биомассы и масла) МКВ. Согласно общепринятому уравнению фотосинтеза

$$6CO_2 + 6H_2O + nh\nu = C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

где hv – энергия одного фотона; n – число фотонов. На восстановление одной молекулы CO2 до глюкозы требуется от 8 до 10 фотонов из диапазона ФАР .

Из чего складывается эффективность преобразования энергии :

1) используется только часть спектра – $К_{ФАР}$ = 50%;
2) КПД фотосинтеза: $К_{ФС}$ = 470/1600 ≈ 30%. Отсюда $K = K_{ФАР}K_{фс} = 0.5 \times 0.3 = 0.15\ (\text{или } 15\%).$
3) Потери на дыхание и фотодыхание: $К_{Д}$=50-65%.

Интегральный коэффициент - 6%.

На основе полученного К интегр. определяем максимальную продуктивность биомассы:

Для экваториальной зоны (радиация: 10 000 МДж/(м2 · год)) продуктивность - 280 (т/га)/год, или в среднем 75 (г/м2)/сут). Южные районы России (радиация: 7 000 МДж/(м2 · год)) продуктивность - 200 (т/га)/год или в среднем 55 (г/м2)/сут).

Нами была рассмотрена теоретически возможная продуктивность биомассы по содержанию масла. При этом задавались значения суммарной падающей солнечной радиации, содержания липидов в биомассе, энергосодержание липидов ($q_{масла} \approx 35,5$ МДж/кг) и сухой биомассы после экстракции жиров ($q_{сух} \approx 15,6$ МДж/кг), коэффициенты преобразования энергии в процессе фотосинтеза. По уравнению энергетического баланса была определена максимально возможная урожайность по маслу при различных значениях эффективности использования солнечной энергии ($К_{фс}=0,5*К_{фар}=0,05…0,33$).

Падающая солнечная радиация, МДж/(м² год) кВтч/(м² день	**Относительное содержание липидов в микроводорослях, %**	**Максимально возможная продуктивность биомассы, т/га/год г/м²/сутки**	**Максимально возможная продуктивность биомассы по маслу (липидам), т/га/год**
10000 / 7,5	**20**	**280 / 75**	**25…168**
10000 / 7,5	**80**		**65…420**
7000 / 5	**20**	**200 / 55**	**20…45**
7000 / 5	**80**		**120…290**

Продуктивность, соответствующая рекордным значениям, заявленным в литературе (до 100 т/(га*год)), может быть достигнута лишь при максимальных теоретически возможных значениях КПД фотосинтеза и весьма высоких значениях содержания масла в водорослях – до 80%. Однако для достижения высокой продуктивности микроводорослей по липидам принципиально важно обеспечить максимально возможные значения $К_{ФС}$ и α.

Количественные оценки влияния различных факторов на продуктивность водорослей и содержание липидов(Weyer K.M., Bush D.R., Darzins A., Willson B.D. //Bioenergy Res., 2010. №3. P. 204-213)

№	Фактор	Характеристика	Теоретически возможный максимум	Наилучший практический результат
1	Полный спектр солнечной энергии, МДж/м^2/год	Величина падающей солнечной радиации	11 616	5 623-7 349
2	Фотосинтетически активная радиация (ФАР)	Доля ФАР в энергии полного спектра солнечной энергии	45,8%	45,8%
3	Энергия фотона, МДж/моль	Средняя энергия фотона из диапазона ФАР	$225,3*10^{-3}$	$225,3*10^{-3}$
4	Эффективность переноса фотонов	Доля полной энергии фотонов, достигающая клетки водорослей (учитываются потери за счет конструкции ФБР и открытых культиваторов)	100%	90%
5	Эффективность использования фотонов	Доля энергии фотонов, участвующих в реакции фотосинтеза (учитываются потери за счет неоптимальных условий роста)	100%	50%
6	Квантовый расход	Кол-во фотонов, участвующих в реакции ФС	8	8
7	Содержание энергии в углеводах, кДж/моль	Энергия, заключенная в продукции фотосинтеза (в пересчете на глюкозу $C_6H_{12}O_6$)	482,5	482,5
8	Эффективность аккумулирования энергии биомассой	Доля энергии, которая переходит в энергию биомассы (учитываются потери на жизнедеятельность клетки)	100%	60%
9	Содержание энергии в биомассе, кДж/кг	Теплота сгорания	$21,9*10^3$	$21,9*10^3$
10	Содержание масла (липидов) в клетке	Доля липидов в массе живой клетки	50%	50%
11	Плотность липидов, кг/м^3	Объемная плотность липидов	918	918
12	Максимальный суточный рост микроводорослей, г/м^2/сутки		196	38-47
13	Среднегодовая продуктивность по маслу, л/га/год		354 000 на экваторе; 171 000-224 000 для условий выбранных 6 географических точек	46 000 - Куала-Лумпур; 50 000 – Денвер; 52 000 – Малага; 56 000 - Тель-Авив; 59 000 - Гонолулу; 60 500 Феникс, США

Энергетический баланс систем культивирования МКВ для условий Британской Колумбии [A. O. Alabi, M. Tampier, and E. Bibeau. http://www.globalbioenergy.org/bioenergyinfo/back ground/detail/fi/c/10661. Cited January 14, 2009; Chernova N. I., Kiseleva S. V., Popel' O. S. // *Thermal Engineering* , 2014. Vol. 61, no. 6. P. 399–405]

Исходные характеристики систем культивирования	Открытые русловые культиваторы	Фотобио-реакторы
Среднесуточная урожайность биомассы по сух. веществу, г/м^2	9,38	15,3
Содержание масла, %	15	25
Энергетический баланс, МДж/л масла:		
потребление электроэнергии	32,0	38,0
энергетический эквивалент потребления удобрений	20,4	12.3
потребление дополнительной энергии (всего)	**52,4**	**50,3**
энергосодержание водорослевого масла	37	37
Энергосодержание биомассы (после выделения липидов)	46,7	21
энергетический эквивалент «недовыброса» CO_2 при культивировании биомассы	8,4	3.8
полезная энергия (всего)	**92,1**	**61,8**
Энергетический выигрыш	**39,7**	**11,5**
Отношение полезной энергии к дополнительным энергозатратам	**1,76**	**1,23**

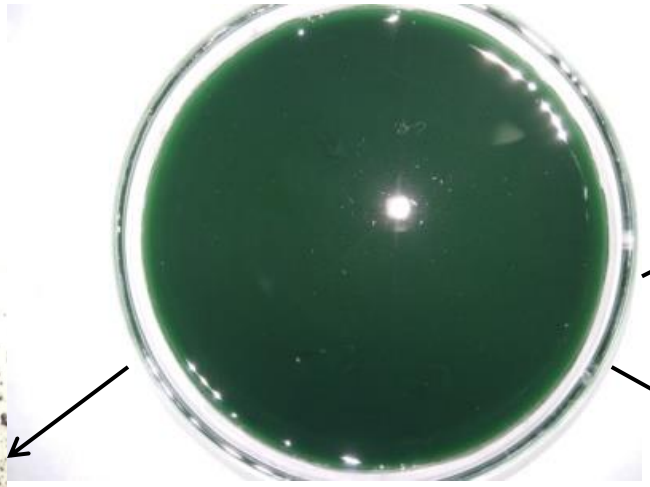
Таблица 2. Основные виды энергозатрат процесса культивирования микроводорослей и методы их сокращения

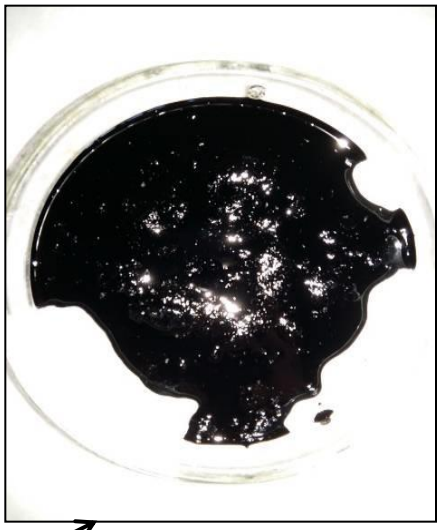
Вид энергозатрат	Способы уменьшения энергозатрат
Производство биогенных элементов для культивирования микроводорослей	Использование для приготовления питательных сред: отходов животноводства; продуктов метанового брожения; морских и геотермальных вод; CO_2, NO_x, SO_x из дымовых выбросов ТЭС
Перемешивание	Использование возобновляемых источников энергии (солнечные, ветровые и комбинированные установки)
Сбор биомассы	Применение методов фильтрации, флотации, флокуляции; сушка с использованием возобновляемых источников энергии
Поддержание оптимального температурного и светового режима культивирования микроводорослей	Использование светодиодных источников; сокращение энергозатрат за счет сбросного тепла ТЭС, АЭС и возобновляемых источников энергии
Капитальное строительство	Употребление дешевых и доступных материалов многоразового использования
Водоснабжение	Использование морской и геотермальной воды, селекция штаммов микроводорослей, адаптированных к средам на морской и геотермальной воде Использование городских сточных вод и водоемов-охладителей АЭС и ТЭС

• **Одним из узких технологических мест конверсии биомассы МКВ является ее высокая влажность, требующая значительной затраты энергии на осушку.**
• **В случае производства биодизеля конвертируется только липидная часть биомассы, в то время как большая часть биомассы, включая белки и углеводы, не участвует в производстве биотоплива.**
• ***Гидротермальное сжижение (HTL)*** **включает в себя обработку водорослей в виде суспензии в перегретой сжатой воде, что позволяет избежать сушки влажного сырья (25 МПа и 330 ° С).**
• **Экспериментально показано, что наибольший выход бионефти методом HTL дают соединения, имеющие бо́льшее содержание углерода в молекуле, в нашем случае, это МКВ с наибольшим содержанием липидов и наименьшим белков.**
• **Экспериментально были подобраны несколько штаммов МКВ из коллекции кандидатных штаммов НИЛ ВИЭ с высокой скоростью роста (от 0,18 до 0,25 г/л/сут по сух.весу) и способные реагировать на физиологический стресс на 2-й стадии выращивания накоплением липидов в клетках.**
• **Были отобраны 3 штамма МКВ, подобраны условия их выращивания на первой и второй стадиях, воздействие стрессоров (насыщение биомассы липидами в микроводорослях *Chlamydopodium и Chlamydomonas* достигалось с помощью воздействия физиологического стресса на 2-й стадии культивирования: голодание по N и P, интенсивное освещение до 350-450 мкЕ/м^{2}с; барботаж углекислым газом в концентрациях 2,5 % об.).**

Продукты конверсии микроводоросли *Arthrospira platensis* методом HTL при различных условиях экспериментов

Исходная суспензия микроводорослей





Бионефть

Бионефть

Углистый остаток

К оценке ресурсного потенциала производства биотоплива из микроводорослей

Основой производства биотоплива является биомасса микроводорослей, которая в климатических условиях России может быть выращена открытым способом/ open method или на открытых площадках в течение теплого времени года или в тепличных комплексах в холодное время года.

Поэтому **под ресурсным потенциалом** в дальнейшем мы понимаем:

-**площадь** пригодной территории, которая может быть использована для производства биомассы МКВ как сырья для получения биотоплива,

- потенциальное **количество биомассы** микроводорослей, которое можно получить на этой территории,

- **количество биотоплива**, которое можно произвести из выращенной биомассы МКВ с использованием той или иной технологии.

Известные условия открытого культивирования большинства промышленных видов микроводорослей позволяют предложить следующий перечень наиболее значимых природных факторов:

- интенсивность солнечной радиации;
- длительность освещения с интенсивностью, не менее необходимой, в течение суток (т.е. соотношение световой и темновой фазы роста);
- температуры (приповерхностный слой почвы);
- режим осадков (распределение количества осадков в течение сезона);
-интенсивность испарения;
- плоская поверхность (уклон не более 5%);
- удаленность от источников природного и техногенного загрязнения.

Поскольку чаще всего необходимые климатические условия обеспечиваются лишь в течение части года, важно определить также временные интервалы, в течение которых имеются необходимые условия освещенности, температуры и т.д. в данной местности.

1а
- **Оценка освещенности (солнечная радиация не менее 4,0 кВтч/м^2/сут или примерно 14 МДж/м^2)**

1б
- **- Оценка температурного режима (число дней в году с температурой не ниже 15^{0}С)**

1в
- **Оценка продолжительности световой фазы (соотношение световой и темновой фазы не менее 6:18)**

Помимо климатических ресурсов для промышленного производства микроводорослей необходимо наличие *инфраструктурных условий (факторов)*:
- наличие свободных земель (неплодородных, бедлендов, неиспользуемых промышленных площадок и т.п.);
- наличие водных ресурсов: морские, пресные и солоноватые воды;
- близость источников углекислого газа,
- транспортная доступность,
- наличие сетевого энергоснабжения или возможность использования возобновляемых источников энергии;
- близость потенциальных потребителей продуктов производства микроводорослей;
- наличие низкотемпературных энергоносителей (сбросные воды ТЭС, АЭС).

2

- **Оценка пригодных по агроклиматическим критериям территорий на более крупном масштабе** (по наличию водных ресурсов, источников CO_2, источников низкотемпературных теплоносителей доступных для промышленного выращивания земель)

Апробация и детальный анализ ресурсного потенциала МКВ на примере Дагестана:
1. природные факторы

Физико-географические факторы производства биомассы микроводорослей как сырья для получения биотоплива

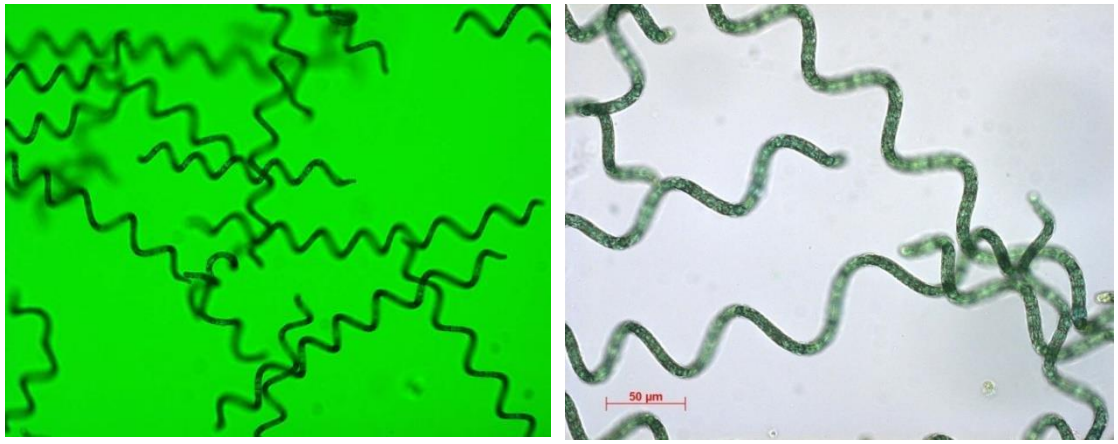
Физико-географические факторы	Вид фактора	Величина фактора/ качеств. характеристика
Климатические	Инсоляция приходящая на горизонтальную поверхность	Не ниже 4 кВтч/м2/сутки (или 14 МДж/м2)
	Соотношение световой и темновой фазы роста МКВ	Не менее 6:18 (световая фаза к темновой фазе, в часах)
	Температура воздуха	Средняя суточная температура не ниже +15°С
Природные источники ресурсов для производства МКВ	Наличие источника термальных вод	Желательно
	Температура термальных вод.	Не ниже 35-40°С
	Наличие источника пресной и морской воды	Необходимо для выращивания водорослей
Геоморфологические факторы	Уклон поверхности	Не более 5%

Значимые для культивирования МКВ климатические характеристики территории Республика Дагестан Средние многолетние метеоданные за период 2005-2018 гг. для г.Махачкала
(по данным сайта rp5.ru и Научно-прикладного справочника СССР)
Цветом выделены те значения, климатических факторов, которые соответствуют требованиям к условиям выращивания МКВ в открытых культиваторах без дополнительных затрат энергии на обогрев и освещение.

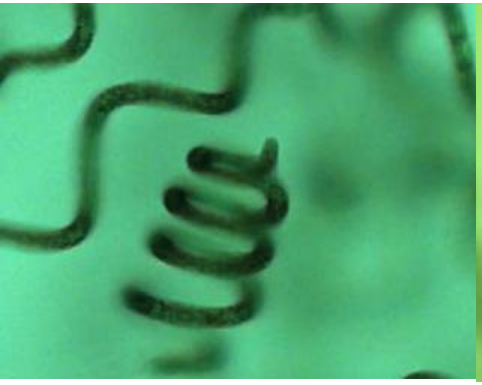
Выбор микроводорослей
В качестве МКВ, для которых были проведены оценки, нами рассмотрены ***Arthrospira/Spirulina platensis и Dunaliella salina.*** Эти два вида МКВ выращивают в промышленных масштабах дешевым открытым способом как для применения в качестве биологически активных добавок к кормам и пище (БАД), так и для получения биотоплива

	Температура воздуха средняя, °С	Солнечное сияние, часы	Соотношение световой и темновой фазы (средняя за месяц)	Средняя суточная сумма суммарной солнечной радиации, МДж/м^2
Январь	+0.4	73	7.40 : 16.20	4,64
Февраль	+1.2	72	9.41 : 14.19	6,7
Март	+5.4	108	11.49 : 12.11	10,36
Апрель	+10.5	175	14.12 : 9.48	16,38
Май	**+17.1**	**244**	**16.18 : 7.42**	**21,87**
Июнь	**+22.6**	**276**	**17.32 : 6.28**	**23,95**
Июль	**+25.2**	**286**	**16.58 : 7.02**	**23,17**
Август	**+25.6**	**273**	**15.04 : 8.56**	**20,28**
Сентябрь	**+21.0**	**197**	**12.46 : 11.14**	**14,82**
Октябрь	+14.3	153	10.29 : 23.31	9,97
Ноябрь	+7.8	85	08.18 : 15.42	5,4
Декабрь	+4.0	66	07.30 : 16.30	4,0
Год	**+12.9**	**2008**		**161,54**

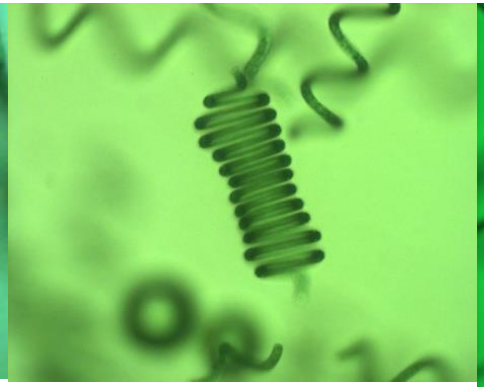
Морфологические варианты клоновой культуры *Arthrospira platensis*:
a - исходная культура *шт. rsemsu 1/02* ; b, c – *шт. rsemsu 1/02-Ф’*; d - *шт. rsemsu 1/02-П*; e - *шт. rsemsu 1/02-Т*.



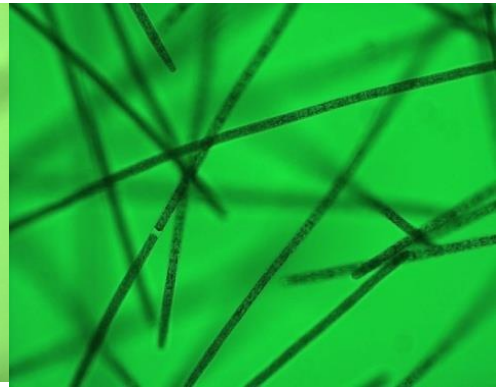
a



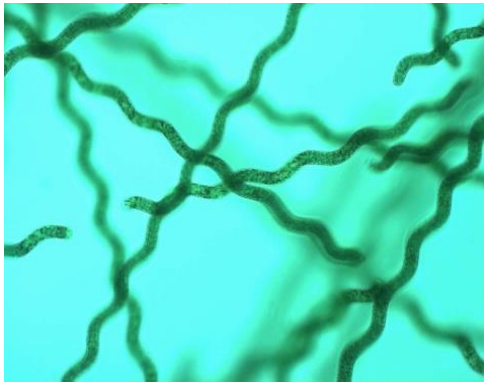
b (x1000)



c (x400)



d (x200)



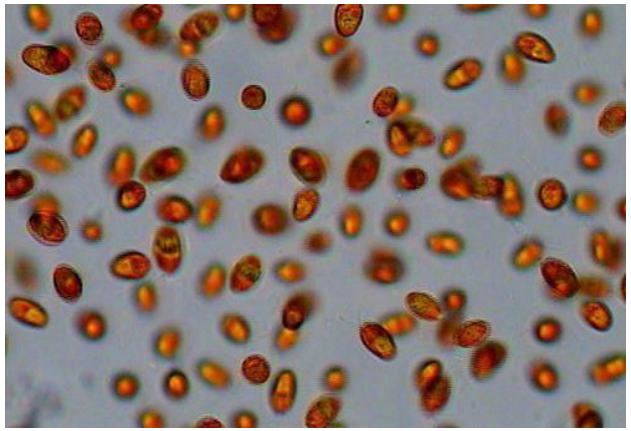
e (x200)

Dunaliella salina Teod.
(Коллекция исполнителей проекта)

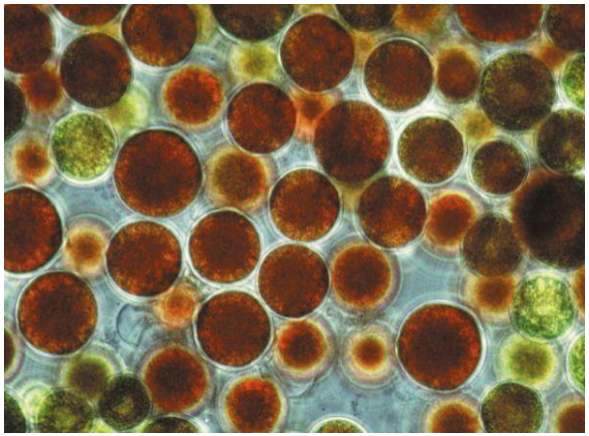
Стадии культивирования:

a-вегетативная стадия; b, c -накопление каротиноидов (световой микроскоп)

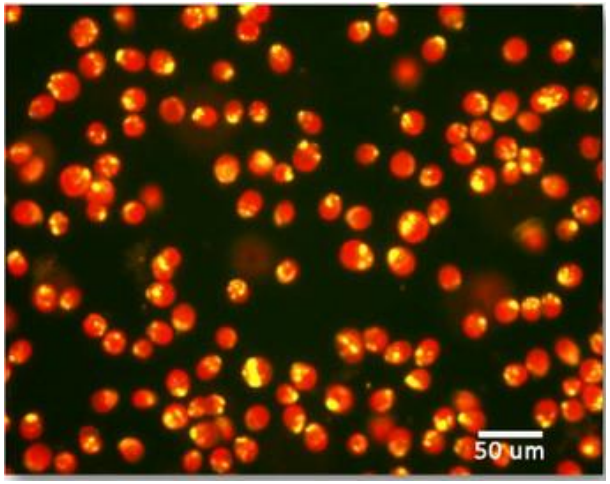
a



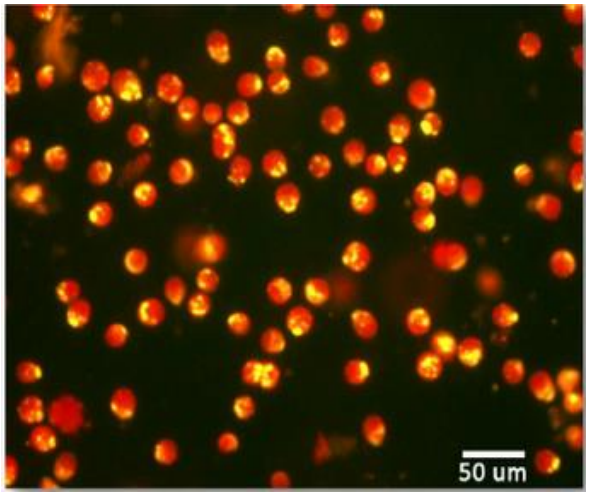
b



c



d



e

d , e - накопление липидов, окраска флуоресцентным красителем Нильским красным (люминесцентный микроскоп)

2. Инфраструктурные факторы

- 1. *Транспортная сеть* позволяет существенно сократить энергозатраты за счет расположения плантаций рядом с источниками сырья, воды и потребителями основных и сопутствующих продуктов производства МКВ, например, рядом с предприятиями по производству комбикорма. Ко-локализация позволяет значительно снизить общие энергозатраты на производство биомассы МКВ и биотопливо. При оценке энергоэффективности ко-локализация производственных процессов и источников сырья подразумевается априори и энергетические затраты на перемещение ресурсов, промежуточных и целевых продуктов предполагаются нулевыми.
- 2. *Территории*, на которых размещение крупных МКВ производств запрещено по причине ограничений на хозяйственную деятельность (особо охраняемые природные территории, промышленные территории, зоны отдыха, виноградники и сады, зоны жилой застройки).
- 3. *Источники дешевой тепловой энергии* (низкопотенциального тепла) для выращивания МКВ – геотермальные месторождения и теплоэлектростанции. 4. *Стационарные источники CO_2* – теплоэлектростанции, цементные, стекольные заводы и заводы по производству удобрений. Выбросы CO2 от цементной промышленности Дагестана и Махачкалинской ТЭЦ составляют около 2 555 000 т/год. Ассимиляция этого количества CO2 МКВ при средней продуктивности биомассы 20 г/м^2/сут даст урожай 1 867 000 т/МКВ в год, или при выращивании МКВ в течение теплого периода года (150 суток) – 930 000 т. Махачкалинская ТЭЦ также дает выбросы диоксида серы – 4 т/год, оксидов азота (в пересчете на NO_2)–21 т/год. Азот и сера являются биогенными элементами, поэтому выбросы NO_x и SO_x также могут быть ассимилированы МКВ.
- 5. *Потребители целевого и сопутствующего продуктов:* для биотоплива – котельные, сельскохозяйственная техника; для сопутствующих продуктов – птицеводство и животноводство. Согласно нашим расчетам, для современного поголовья птицы в Дагестане требуется около 300 т биомассы МКВ/год (при добавке к кормам 1%). В перспективе можно предусмотреть целевое производство витаминных добавок (каротиноиды, витамины групп А и В) из МКВ, а оставшуюся б**о**льшую часть биомассы использовать для трансформации в биотопливо.

Возможные пути повышения эффективности энергетического использования МКВ

- **Поиск высокопродуктивных штаммов МКВ энергетического назначения, создание и наполнение отечественных коллекций МКВ;**
- **Обеспечение высокой эффективности преобразования световой энергии в биомассу и достижение высокого содержания липидов в ней;**
- **Снижение затрат дополнительной энергии на обеспечение культивирования МКВ;**
- **Оптимизация конструкций культиваторов и ФБР для снижения капитальных затрат на их создание;**
- **При оптимальной организации процесса энергосодержание конечных продуктов может превышать затраты дополнительной энергии на выращивание микроводорослей даже без учета энергетического эквивалента “недовыброса” CO_2 при культивировании МКВ. При этом значительную долю в общем энергосодержании получаемых продуктов составляет энергия отходов биомассы после экстракции липидов;**
- **Производство ценных сопутствующих продуктов с высокой добавочной стоимостью (астаксантин, β-каротин, фикоцианин, хлорофилл) также может существенно повысить рентабельность производства.**

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Достигнутые показатели энергоэффективности в лабораторных и пилотных проектах.

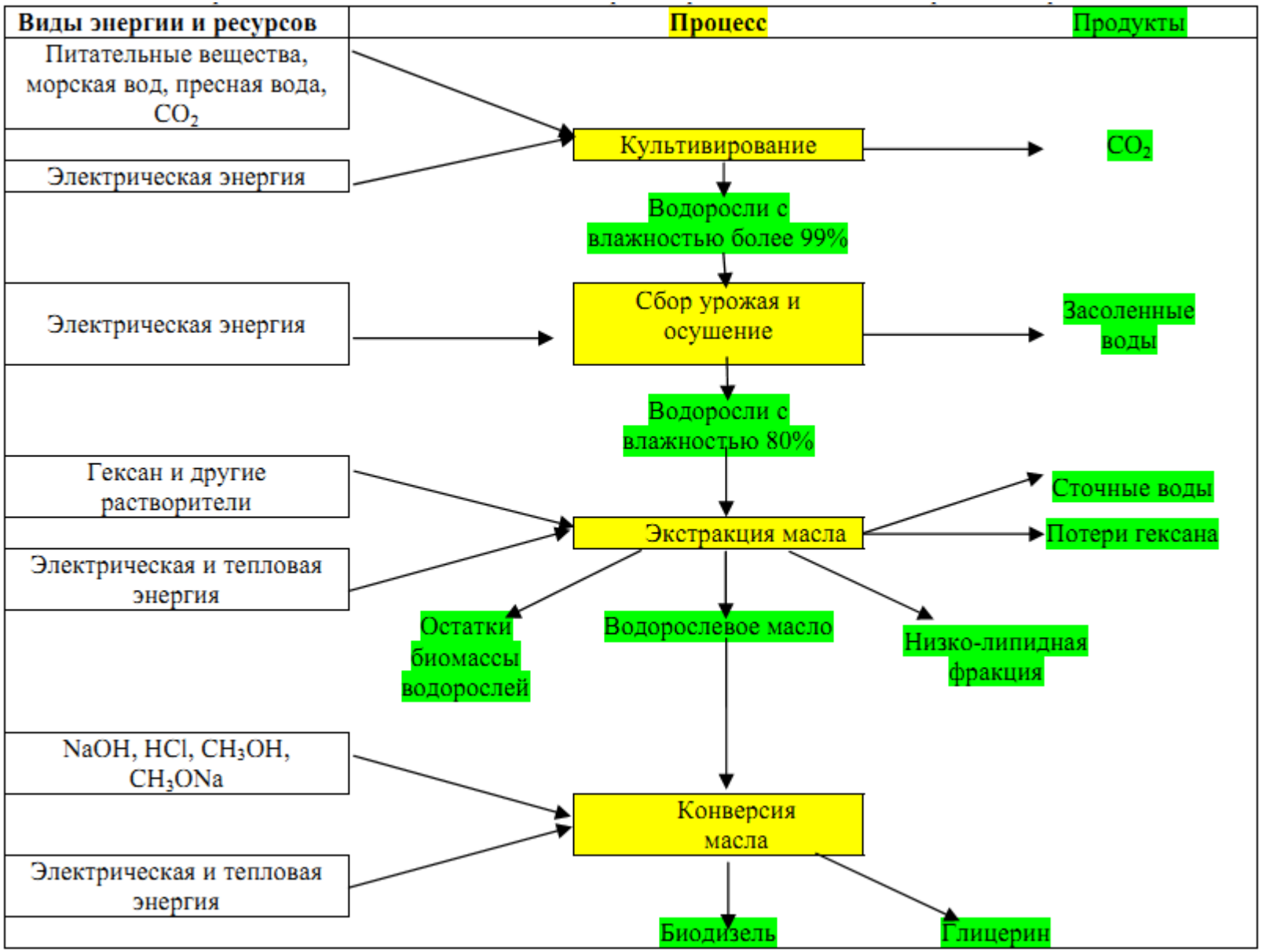
Характеристики, отражающие затраты энергии на получение биодизеля из микроводорослей.

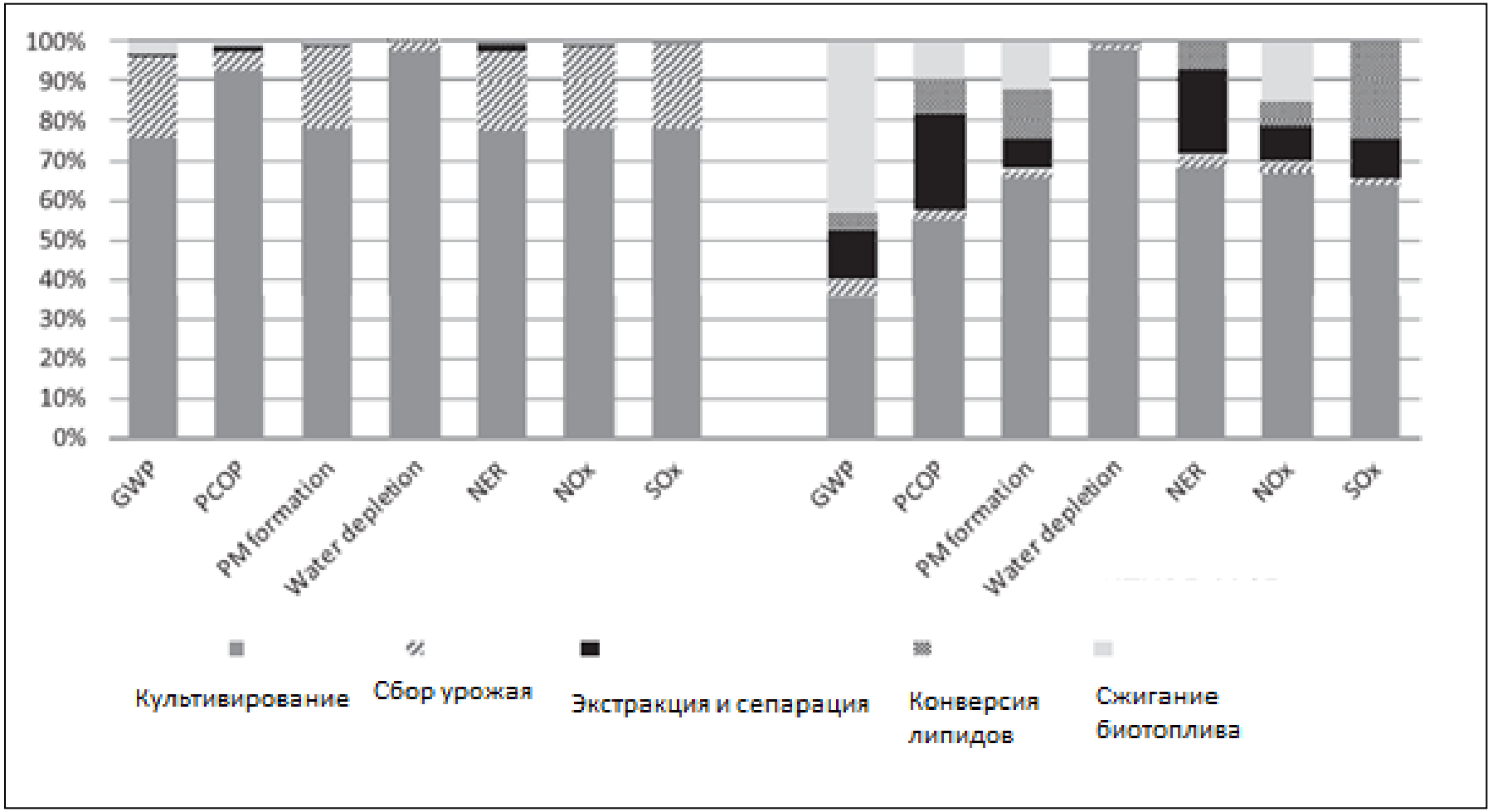
Для оценки энергозатрат при производстве биотоплива используется широкий ряд показателей:

- EROI (Energy Return On Investment), равный отношению общей энергии получаемого биотоплива и сопутствующих продуктов к энергии, затраченной на производство (этот показатель рассматривался для оценки энергозатратности на первом этапе выполнения проекта).
- NER (Net energy ratio) - чистые энергетические затраты, равные отношению , энергии, затраченной на производство биотоплива к энергии получаемого биотоплива.
- FI (Fossil input) - удельные затраты ископаемого топлива на производство биотоплива.
- Баланс затраченной и полученной эксергии (полезной энергии) и др.

Основным методом исследований при рассмотрении энергозатрат является анализ жизненного цикла (Life cycle assessment – LCA).

Системные границы (какие затраты энергии учитываются)





Структура энергозатрат (NER), воздействия на глобальное потепление (GWP), выбросов в окружающую среду (PCOp, NOx, Sox), затрат воды (Water depletion) при производстве биодизеля для базового случая (лабораторный эксперимент) – слева и для промышленного уровня производства – справа.