

НАУКА ЗА РУБЕЖОМ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ НАУКИ РАН

ИССЛЕДОВАНИЯ ОКЕАНА: ПЕРСПЕКТИВЫ МОРСКОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ

Наука за рубежом

№ 28, январь 2014

Ежемесячное обозрение

Электронное издание:

www.issras.ru/global_science_review

Рубрика «Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство, пищевая и химическая промышленность»

Обзор выполнил **Н. А. Трофимов**

Выпускающее подразделение: **Сектор анализа зарубежной науки**

Руководитель проекта **Л. К. Пипия**

Редактор **О. Е. Осипова**

Верстка: **Н. В. Шашкова**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Оценка биологических ресурсов Мирового океана	5
2. Перспективы развития морской биотехнологии и ключевые направления исследований	8
ПРИЛОЖЕНИЕ	12
Рис. 1. Морская биотехнология: ресурсы, инфраструктура, инновации	12
Рис. 2. Пирамида стоимости основной продукции морской биотехнологии	12
Рис. 3. Прогресс в области секвенирования генетического материала	13
Табл. 1. Примеры функциональной пищи, получаемой на основе морской биомассы	14
Табл. 2. Эффективность производства биотоплива в зависимости от используемых культур	15

Биотехнология все активнее проникает во многие сферы человеческой деятельности. Это прежде всего касается многоотраслевой экономики, связанной с освоением пока еще малоизученных и на первый взгляд безграничных ресурсов Мирового океана. Вместе с тем для устойчивого развития морского биотехнологического сектора важно осознать ограниченность и уязвимость этих ресурсов, о чем свидетельствует конкурентная борьба за них и экологические последствия нерационального вмешательства человека в жизнь океана. Эксперты из развитых стран уделяют значительное внимание применению арсенала средств биотехнологии на базе морских ресурсов для поиска ответа на такие острые глобальные вызовы, как дефицит продуктов питания, топлива, медикаментов, необходимость поддержания систем здравоохранения и промышленного производства.

Введение

В сентябре 2013 г. Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) опубликовала обзор, посвященный современному состоянию и перспективам развития морской биотехнологии¹ [1]. В публикации рассматривается потенциал и значение Мирового океана для экономики в свете прогресса в области геномных технологий, а также затрагиваются вопросы планирования международных программ и проектов по освоению морских ресурсов на основе принципов устойчивого развития и рационального природопользования.

Интерес к морской биотехнологии возрастает по мере развития научно-исследовательской базы и инструментов современной генетики, позволяющих пополнить знания о биоразнообразии морских организмов и экосистем. Этому также способствует прогресс в поиске новых видов морской жизни.

Освоение Мирового океана является одним из приоритетных направлений деятельности для большинства стран. В настоящее время более половины населения планеты проживает на расстоянии до 100 км от морского побережья, а в будущем при неуклонном росте численности населения эта доля может существенно возрасти [2]. Океанические течения переносят морские организмы, питательные вещества и отходы на огромные расстояния, в том числе далеко за пределы границ государств.

¹ От англ. marine biotechnology.

Тесная взаимосвязь экосистем океана приводит к выводу о необходимости взвешенного управления ресурсами Мирового океана на международном уровне. В настоящее время принят ряд международных соглашений и конвенций, направленных на сохранение океанического биоразнообразия. Однако зачастую положения документов, выходящие за рамки национальных юрисдикций, не действуют. Это говорит о необходимости в определении на политическом уровне механизмов международного регулирования доступа к богатствам Мирового океана и предотвращения экологических угроз, связанных с нерациональным природопользованием. Страны ОЭСР осуществляют целенаправленную деятельность в этой области и намерены и в дальнейшем предпринимать последовательные шаги для укрепления международного сотрудничества и поощрения совместных инициатив.

Среди наиболее перспективных направлений в регулировании освоения ресурсов океана – организация международных инфраструктур и платформ для совместных исследований и разработок в области биотехнологии. По мере того как морская биотехнология станет одним из основных приоритетов для государственных инвестиций в НИОКР и развития национальных инновационных стратегий, потребуются разработать и внедрить новые измерения и показатели эффективности государственных и частных вложений.

К настоящему времени морская биотехнология имеет достаточно широкий диапазон практического применения. Это производство биотоплива, продуктов питания и кормов, а также фармацевтика и химическая промышленность, которые уже сегодня немыслимы в отрыве от достижений морской биотехнологии (табл. 1). В дальнейшем значение данной отрасли для мировой экономики, по всей видимости, будет только расти.

1. Оценка биологических ресурсов Мирового океана

Несмотря на то что добыча рыбы, моллюсков, растений и млекопитающих из Мирового океана велась человечеством на протяжении тысячелетий, до сих пор крайне мало известно о совокупности океанических биоресурсов. Океанические толщи по-прежнему остаются неизведанными, а многообразие жизни в них по сей день не поддается точной оценке.

Недавние достижения генетики, а также прогресс в исследовании Мирового океана во многом стали источником львиной доли знаний о морской географии и биоразнообразии океанических экосистем. По результатам таких крупных проектов, как «Первая перепись морской жизни»², стало известно, что на Земле может существовать порядка миллиона видов морских многоклеточных существ и сотни миллионов видов микробов. Есть все основания полагать, что современные ученые вообще ничего не знают о 90% видов живых существ, обитающих в глубинах Мирового океана. Показательно, что из 36 известных на сегодняшний день биологических типов все, за исключением двух, проживают в океане, а 13 – живут исключительно в морской среде.

В одном грамме океанической воды в среднем проживают 10 млн вирусов и 1 млн прокариотов. По имеющимся оценкам, лишь 1% всех океанических бактерий может культивироваться искусственным образом с использованием известных методов. Очевидно, что изучение морских вирусов, бактериальных и вирусных фагов представляет собой еще больший вызов для современных научных методов. В количественном исчислении 90% морских жителей – вирусы, 8–9% – прокариоты и остальная часть – протисты. Количество крупных многоклеточных обитателей морей сравнительно ничтожно.

Морская биотехнология включает множество сфер применения биологических ресурсов. Морские организмы используются в качестве сырья для производства продуктов питания, топлива, материалов, химикатов и биологически активных веществ. Все чаще производные продукты биотехнологии получают в лабораториях, используя знания о свойствах, функциях и естественных метаболических процессах морских форм жизни, путем генной инженерии и синтетической биологии. Помимо того, морские организмы находятся в фокусе исследований, касающихся вопросов применения биокатализаторов, биосенсоров и биоремедиации. Открытия и достижения, полученные в результате биотехнологических экспериментов и разработок, позволяют не только выпускать коммерчески ценную продукцию, но и совершенствовать методы вакцинации, кормления и вос-

² От англ. First Census of Marine Life – международный проект по изучению географии и биологии Мирового океана, давший возможность открыть более 6 тыс. новых видов океанической жизни, увеличив тем самым количество известных видов морских организмов до 250 тыс.

производства в рыбных хозяйствах, применять полученные знания для лучшего понимания и картирования морских экосистем (рис. 1).

Многие страны ОЭСР рассматривают морскую биотехнологию в качестве одного из средств увеличения национального благосостояния при условии сохранения экологического баланса. Например, в Корее действует стратегический план Blue-Bio 2016, согласно которому к 2016 г. в Корее уровень валового национального дохода на душу населения достигнет 40 тыс. долл. США благодаря инновациям в морской биотехнологии.

В настоящее время Евросоюз поддерживает проекты в области морской биотехнологии, которые ориентированы преимущественно на координацию усилий отдельных государств ЕС, включая такие проекты, как, например, AMPERA, MARIFISH и Marine Genomics Europe. Среди европейских стран эксперты ОЭСР отмечают биотехнологические инициативы Норвегии, которая в рамках программы норвежского Исследовательского совета BIOTEK 2021 (бюджет около 250 млн долл. США) поощряет исследования и разработки в области сельскохозяйственной, морской, промышленной и медицинской биотехнологии. Программа BIOTEK 2021 является продолжением программы в области функциональной геномики FUGE на 2001–2011 гг. (бюджет более 250 млн долл. США) [3].

Эксперты ОЭСР связывают глобальное потепление и изменение климата Земли с возможностью повышения уровня Мирового океана и нарушением деликатного баланса океанических экосистем. Прогнозируемое изменение привычных температурных режимов и увеличение частоты экстремальных погодных явлений, в свою очередь, приведет к вымиранию ряда живых организмов и распространению вспышек инвазивных видов. По имеющимся оценкам, потепление морской воды привело к снижению на 1% популяции фитопланктона, вырабатывающего более половины запасов кислорода планеты.

Океан как основной поглотитель атмосферного углерода абсорбировал со времен промышленной революции около 700 млрд т двуокси углерода. В результате водородный показатель океанических вод понизился на 0,1 рН, а кислотность океана возросла на 30%. Основной ущерб

это причинило популяциям кораллов и ракообразных, что по цепочке поставило под угрозу существование многих рыб и моллюсков.

Чрезмерный океанический промысел привел к истощению многочисленных рыбных запасов до критического уровня, за которым следует полное исчезновение многих видов. Около 75% рыбных запасов планеты считаются истощенными. Рыболовные технологии, подобные траловому лову, также нарушили океаническую донную среду обитания. Разработка прибрежных месторождений и связанные с ней отходы, загрязнение океана вследствие сельскохозяйственной деятельности привели к массовому появлению зон гипоксии и так называемых мертвых зон. Мельчайшие частицы загрязнителей, многие из которых содержат токсичные химикаты или тяжелые металлы, попадают в организм планктона и далее зачастую продвигаются вверх по пищевой цепочке. Все перечисленные угрозы океаническим ресурсам реальны, и в большинстве случаев потенциальный ущерб необратим.

При сохранении существующих в глобальной демографии тенденций, для того чтобы накормить 9 млрд человек в 2050 г., потребуется увеличить производство продуктов питания на 70%, что связано со значительными трудностями. При этом потребление протеинов животного происхождения может увеличиться почти вдвое к середине века. Это возможно при сильном росте производства мяса птицы и рыбы – источников белка животного происхождения с наименьшим возможным негативным воздействием на экологию. Уже сегодня пища океанического происхождения составляет белковый рацион для более чем 1 млрд человек. Дальнейшее увеличение производства рыбопродуктов возможно только при внедрении существенных инноваций, многие из которых, по мнению экспертов, будут связаны с биотехнологией.

2. Перспективы развития морской биотехнологии и ключевые направления исследований

По-прежнему одним из наиболее перспективных сегментов морской биотехнологии считается выращивание энергоемких культур водорослей. Эксперты ОЭСР полагают, что использование водорослей для производства биотоплива перспективно по нескольким причинам. Некоторые виды

морских водорослей позволяют достичь большей энергетической эффективности биомассы в расчете на тонну сырья. К тому же водоросли растут значительно быстрее, чем традиционные сельскохозяйственные культуры, такие как соя или хлопок. По некоторым оценкам, переход к культивированию водорослевых энергетических культур способен существенно сократить площади, необходимые для производства аналогичных объемов биотоплива на суше (табл. 2). Например, плантаций водорослей площадью 39 тыс. км², что примерно соответствует величине Азовского моря, могло бы хватить для полной замены нефтяного топлива в США.

Другим важным направлением развития морской биотехнологии является производство пищевых и фармацевтических добавок, химикатов и биологически активных веществ. Например, морские микроорганизмы могут использоваться в производстве многих новых видов экзополисахаридов. О значении этих соединений свидетельствует широкое применение ксантановой камеди (ксантана, также известного как пищевая добавка E415), получаемой на основе бактерии *Xanthomonas campestris*, вызывающей заболевания растений в природной среде. Данный вид полисахаридов присутствует в пищевых продуктах и косметике. Его также используют при бурении скважин в нефтедобывающей отрасли: ксантан добавляют в буровой раствор для ингибирования набухания глинистых почв.

Многие соединения морского происхождения оказывают неоценимую помощь ученым при проведении генетических исследований. Например, энзимы *Thermus aquaticus* используются для амплификации небольших количеств ДНК. Биолюминесцентные соединения, такие как белок экворин или зеленый флуоресцентный белок (GFP), выделенные из медузы *Aequorea victoria*, широко используются в трансгенных организмах, например для детекции загрязняющих веществ в воде и почве.

Одним из объектов пристального внимания биотехнологов является аквариумная рыбка Данио-рерио (*zebrafish*), обладающая рядом особенностей, в том числе способностью к регенерации органов. После открытия механизмов РНК-интерференции (RNAi) стало реальностью создание генетически модифицированных организмов, не содержащих встроенных в геном трансгенов, кодирующих белок [4]. Например, исследуются раз-

личные RNAi-реакции подавления генов (gene silencing) у рыбки Даниорерио, вызываемые воздействием УФ-излучения, с использованием флуоресцентных меток [5].

Продолжается обсуждение перспектив биорафинировочных заводов, работающих полностью на биологическом сырье океанического происхождения, которые дают возможность получать как основной вид полуфабрикатов (биотопливо) с относительно невысоким маржинальным доходом, так и серию продукции с более высокой прибылью и меньшими объемами производства, в том числе фармацевтическую и косметическую (рис. 2). Например, бизнес-модель биорафинировочного комплекса на основе микроводорослей может включать помимо основного продукта – биодизеля производство другой коммерчески выгодной продукции, в том числе этанола и биогаза, а также кормов с высокой долей протеинов для сельского хозяйства и пищевой промышленности.

Морская биотехнология уже сегодня позволяет получить различные биосенсоры, которые в перспективе целесообразно использовать не только для мониторинга экологической обстановки и предупреждения загрязнения океанических вод продуктами нефтедобывающей промышленности или выявления вспышек инвазивных видов, но также и для выявления генетически модифицированных организмов и видового разнообразия морских экосистем. Данные технологии необходимы и для биоремедиации загрязненных морских зон, учитывая, что многие бактерии способны эффективно расщепить и нейтрализовать загрязнители различного происхождения.

Развитию морской биотехнологии способствует прогресс в секвенировании генетического материала. Например, технология HiSeq компании Illumina уже сегодня дает возможность получать порядка 10 Тб данных ежегодно в расчете на один секвенатор. К 2015 г. объем данных возрастет до 112 Тб (рис. 3). В то же время стремительно сокращается стоимость секвенирования в расчете на один нуклеотид.

Перспективы будущих крупных международных мегапроектов в области морской биотехнологии представляются большинству экспертов вполне оправданной инвестицией. К примеру, открытия и достижения

крупнейшего в мире американского проекта по изучению генома человека, потребовавшего финансирования в объеме 6 млрд долл., принесли экономике США доход около 800 млрд долл., а также дали возможность создать более 300 тыс. новых рабочих мест. Сравнительно недавний проект 1000 Genomes, задача которого – выявление деталей генетической вариации среди 1000 индивидуальных геномов, за три года работы предоставит ученым в 60 раз больше информации в открытом доступе о ДНК-последовательностях, чем все проекты за предыдущую четверть века.

Научно-исследовательское сообщество в интеграции с промышленностью приступило к некоторым перспективным разработкам и демонстрационным проектам. Например, ЕС осуществляет проект BIOFAT, имеющий бюджет более 30 млн евро, который должен продемонстрировать возможности морской биотехнологии и экономическую выгоду от производства биотоплива на основе водорослей. Аналогичный проект GREENSTARS с бюджетом порядка 160 млн евро выполняется во Франции. Однако, по мнению экспертов ОЭСР, необходимо продолжать стимулировать интерес к морской биотехнологии различных стран, а также международные усилия для развития этого направления.

Среди проблем дальнейшего развития морской биотехнологии выделяется вопрос о возможности получения максимально достоверной и объективной оценки экономической результативности освоения Мирового океана с использованием достижений современной геномики, т. е. его влияния на повышение благосостояния национальных государств и стран ОЭСР. Важно также наличие методов измерения и оценки окупаемости инвестиций, включая новые статистические измерения и показатели. Развитие морской биотехнологии включает в себе также нерыночную ценность, а именно сохранение экологии для будущих поколений и повышение качества жизни людей, поэтому необходимо ввести в методику оценки показатели «здоровья» морских экосистем. Только здоровый Мировой океан и здоровая морская биотехнология могут стать залогом экономического процветания отдельных наций и человечества в целом.

Приложение

Рисунок 1. **Морская биотехнология: ресурсы, инфраструктура, инновации**

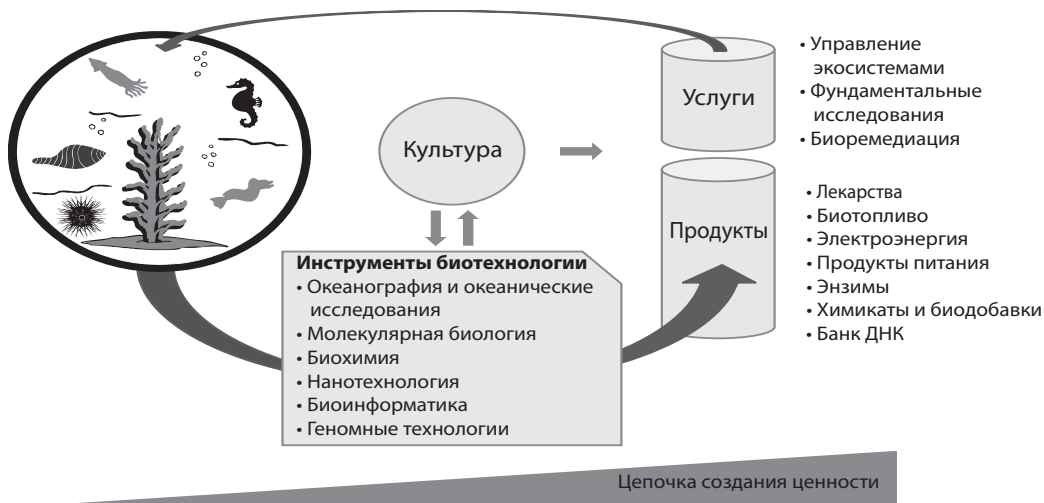


Рисунок 2. **Пирамида стоимости основной продукции морской биотехнологии**

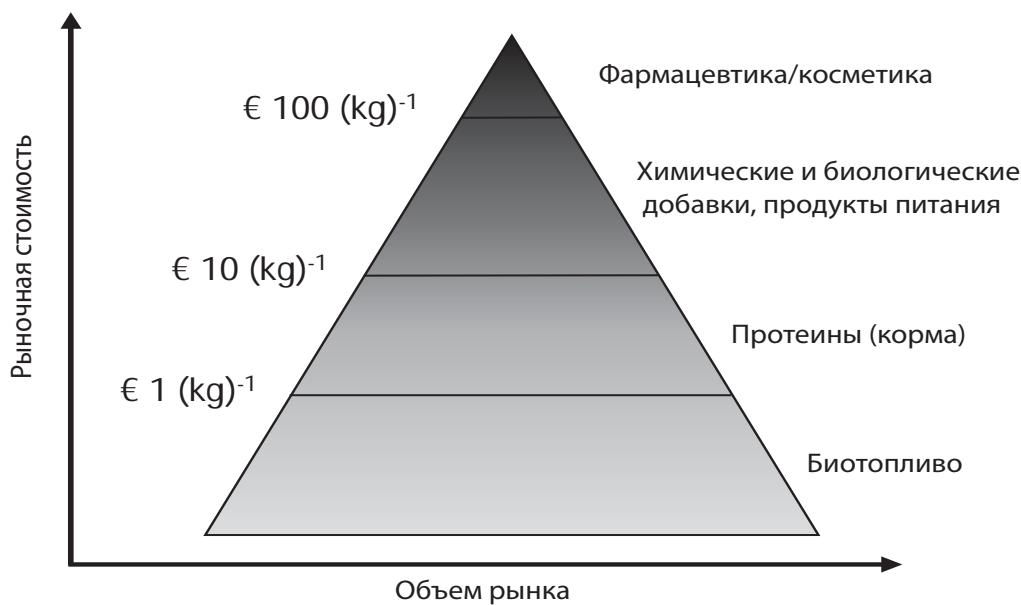


Рисунок 3. Прогресс в области секвенирования генетического материала

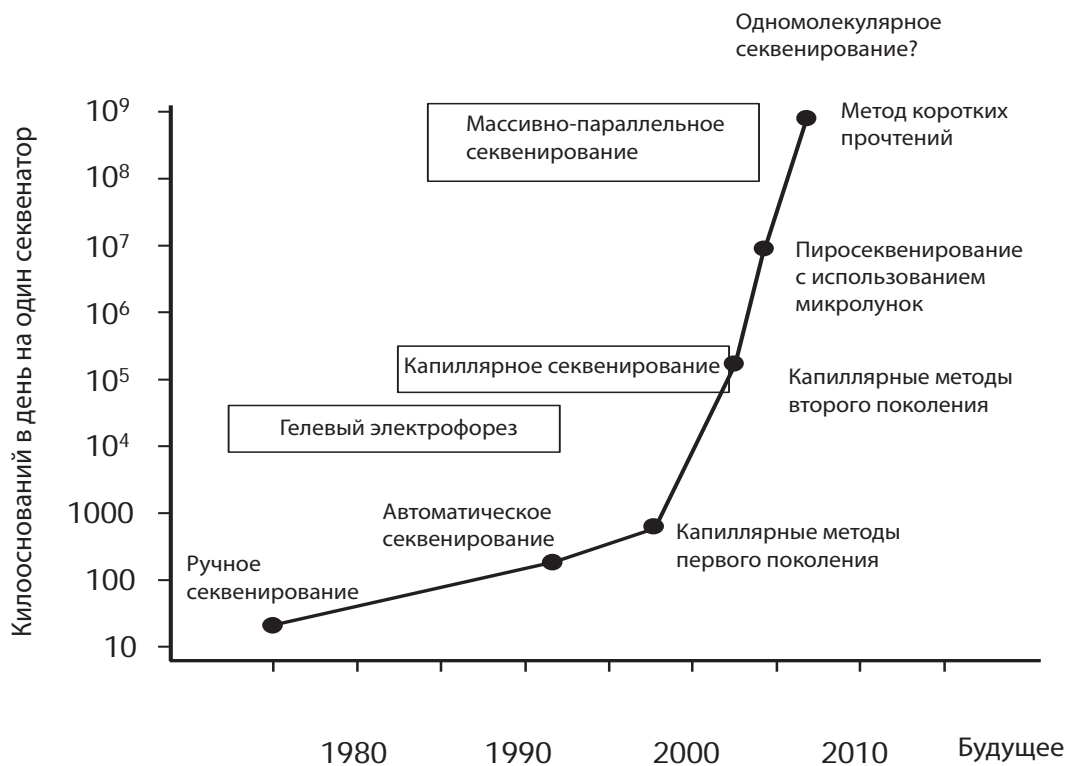


Таблица 1. Примеры функциональной пищи, получаемой на основе морской биомассы

Ингредиенты	Области исследования
Рыбы	
LC n-3 PUFA (омега-3 жирные кислоты)	Метаболический синдром, рак, воспалительные заболевания, нарушения мозговой деятельности, шизофрения, депрессия, различные проявления во время беременности
Фосфолипиды	Терапевтическое воздействие на мозг, подавление раковых клеток
Витамин D	Укрепление костей, воспалительные заболевания, рак, болезни мозга, беременность
Селен (Se)	Иммунная система, вирусные заболевания, репродукция, рак, нарушения функции щитовидной железы, болезни молочной железы
Рыбные пептиды и гидролизаты	Высокое давление, низкий иммунитет, анемия при раке
Рыбные аминокислоты	Атеросклероз, кровяные липиды, воспалительные заболевания, окислительный стресс, диабет II типа
Протеины	Высокое давление, метаболизм липидов, ожирение, метаболизм глюкозы, чувствительность к инсулиновым препаратам
Моллюски	
Хитозан и глюкозамин	Повышенный холестерин, инфекции, рак, слабый иммунитет, раны, болезнь Альцгеймера
Хондроитина сульфат	Остеоартрит, ожирение, рак, окислительный стресс, нейронные заболевания
LC n-3 PUFA	Недоношенные дети, перекисное окисление липидов
Морские водоросли	
Протеины, пептиды, аминокислоты	Высокое давление, слабый иммунитет, ожирение, нарушение обмена веществ, метаболизм глюкозы и липидов
Жирные кислоты	Воспалительные и сердечные заболевания
Полисахариды (сульфатированный фукан и сульфатированный галактан)	Окислительный стресс, вирусы, кардиопротективное действие
Метаболиты (полифенолы и стероиды)	LDL холестерин, антиоксиданты, диабет, воспалительные заболевания
Витамины (C и E)	Окислительный стресс
Пигменты (каротиноиды и хлорофиллы)	Цереброваскулярные болезни

**Таблица 2. Эффективность производства биотоплива
в зависимости от используемых культур**

Культура	Выработка масла, л/га	Требующаяся под культуру площадь*, млн га	В % от площади сельскохозяйственных земель в США
Кукуруза	172	1540	846
Соя	446	594	326
Рапс	1190	223	122
Ятрофа	1892	140	77
Кокос	2689	99	54
Пальмовое масло	5950	45	24
Микроводоросли (70%)**	136900	2	1,1
Микроводоросли (30%)***	58700	4,5	2,5

* Требуется для обеспечения 50% энергетических потребностей транспортного сектора в США.

** 70% масел (в весовом соотношении) в биомассе.

*** 30% масел в биомассе.

Обзор выполнен на основе следующих публикаций:

1. OECD (2013), *Marine Biotechnology: Enabling Solutions for Ocean Productivity and Sustainability*. OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264194243-en>
2. *Oceans: The Source of Life: United Nations Convention on the Law of the Sea, 20th Anniversary (1982–2002)*. UN, Department of Public Information, 2002.
3. *Biotechnology for Innovation (BIOTEK2021)*. <http://www.forskningsradet.no>
4. Генетически модифицированные организмы и проблемы биобезопасности: Учеб.-метод. пособие / Ин-т подготовки научных кадров НАН Беларуси. Минск, 2011.
5. Blidner R.A., Svoboda K.R. et al. Photoinduced RNA interference using DMNPE-caged 2'-deoxy-2'-fluoro substituted nucleic acids in vitro and in vivo // *Mol. BioSyst.* 2008. № 4. P. 431–440.

Тематические рубрики ежемесячного обзора

Аэронавтика и космос

***Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство,
пищевая и химическая промышленность***

Информационные и телекоммуникационные технологии и
вычислительная техника

Исследования в области ядерной и квантовой физики

Медицинские технологии и оборудование

Нанотехнологии и новые материалы, микроэлектроника

Социальные и экономические науки и статистика

Энергетика и транспорт