

2. Биотопливо и сельское хозяйство — технический обзор

Традиционная биомасса, в том числе топливная древесина, древесный уголь и навоз, продолжает оставаться важным источником энергии во многих регионах мира. Биоэнергия является основным источником

энергии для большей части населения мира, живущей в крайней нищете и использующей эту энергию в основном для приготовления пищи. В настоящее время более современные и эффективные технологии конверсии позволяют производить биотопливо в твердой, жидкой и газообразной формах из таких материалов как древесина, сельскохозяйственные культуры и отходы. В настоящей главе дается общий обзор биотоплива: что оно собой представляет, каковы его возможности и как оно влияет на сельское хозяйство. Основное внимание уделяется, однако, жидкому биотопливу для транспорта, которое приобретает сегодня все большее значение в результате стремительного роста его использования.

РИСУНОК 4

Биотопливо - от сырья до конечного использования



Виды биотоплива

Биотопливо представляет собой энергоноситель, который хранит энергию, полученную из биомассы². Для производства биоэнергии в самых разных формах можно использовать широкий спектр источников биомассы. Например, для получения электричества, тепла, теплоэнергии и других форм биоэнергии можно использовать продукты питания, волокна и отходы деревообработки, которые обеспечивает промышленный сектор; энергетические культуры, культуры с коротким вегетационным периодом и сельскохозяйственные отходы, которые обеспечивает сектор сельского хозяйства; и отходы лесного сектора. Биотопливо можно назвать *возобновляемым* источником энергии, поскольку оно представляет собой одну из форм преобразованной солнечной энергии.

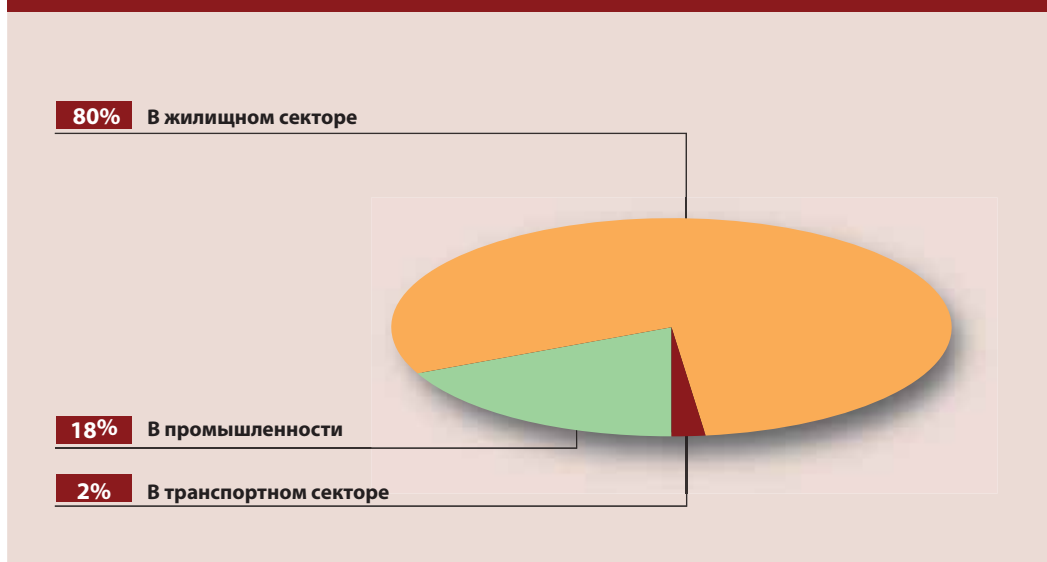
Биотопливо можно классифицировать по источнику и по типу. Его получают из продуктов лесного, сельского или рыбного хозяйства или из городских отходов; из побочных продуктов и

Источник: ФАО.

² Обзор терминологии, касающейся биотоплива, см. ФАО (FAO, 2004а).

РИСУНОК 5

Виды использования биомассы для энергопроизводства



Источник: МЭА (IEA, 2007).

отходов агропромышленности, пищевой промышленности и предприятий пищевого обслуживания. Оно может быть *твердым*, как, например, топливная древесина, древесный уголь и древесные гранулы; *жидким*, как, например, этанол, биодизель и пиролизное масло, или *газообразным*, как, например, биогаз.

Основное разграничение также проводится между *первичным* (необработанным) и *вторичным* (обработанным) биотопливом:

- **первичное биотопливо**, например, топливная древесина, древесная щепа и гранулы, представляет собой топливо, органический материал которого используется главным образом в своей природной форме (как он был заготовлен). Оно сжигается непосредственно, обычно с целью удовлетворения нужд в топливе для приготовления пищи, обогрева или производства электроэнергии на малых и крупных промышленных объектах;
- **вторичное биотопливо** в твердой (например, древесный уголь), жидкой (например, этанол, биодизель и биомасло) или газообразной (например, биогаз, синтез-газ и водород) форме может использоваться для широкого спектра областей применения, включая транспорт и высокотемпературные промышленные процессы.

Жидкое биотопливо для транспорта³

При всей ограниченности общего объема жидкого биотоплива для транспорта, сырьем для производства которого является сельскохозяйственная и продовольственная продукция (см. рисунок 5), именно с ним связывается в последние годы наиболее значимый рост. Самые важные разновидности такого топлива — этанол и биодизель.

Этанол

Для производства этанола можно использовать любое сырье, содержащее значительное количество сахара, или материалы, которые могут быть преобразованы в сахар, например, крахмал или целлюлоза. Этанол, поставляемый сегодня на рынки биотоплива, производится на основе сахара или крахмала. Обычными сахароносными культурами, которые используются в качестве сырья, являются сахарный тростник, сахарная свекла и, в меньшей степени, сладкое сорго. Стандартное крахмалистое сырье получают из кукурузы, пшеницы и маниоки. Простейшим способом производства этанола является использование

³ В основу настоящего раздела положены материалы Глобального биоэнергетического партнерства (GBEP, 2007, стр. 2–10) и МЭА (IEA, 2004).

биомассы, содержащей сахара, которые могут напрямую ферментироваться до этанола. В Бразилии и в других тропических странах, которые в настоящее время производят этанол, наиболее широко применяемым сырьем является сахарный тростник. В странах ОЭСР большая часть этанола производится из крахмалистых компонентов зерновых (хотя также используется сахарная свекла), которые сравнительно просто могут быть преобразованы в сахар. Следует отметить, однако, что эти крахмалистые продукты составляют лишь малый процент от всей растительной массы. Большая часть растительного материала состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина; первые два вида биомассы могут быть преобразованы в спирт после предварительного превращения в сахар, но такой процесс более сложен, чем получение крахмала. В настоящее время этанол из целлюлозной биомассы в промышленных масштабах практически не производится, однако в этой области ведутся активные научные исследования (см. раздел о биотопливе второго поколения на стр. 20–21).

Этанол может смешиваться с бензином или сжигаться в чистом виде в несколько модифицированных двигателях с искровым зажиганием. Литр этанола содержит примерно 66 процентов энергии, обеспечиваемой литром бензина, но имеет более высокое октановое число и, при смешивании с бензином для использования в транспортных средствах, улучшает его показатели. Кроме того, он улучшает сгорание топлива в автомобилях, тем самым уменьшая выбросы окиси углерода, несгоревших углеводородов и канцерогенов. Однако сжигание этанола также вызывает более активную реакцию с азотом в атмосфере, что может привести к незначительному увеличению газообразных окислов азота. По сравнению с бензином этанол содержит лишь следовые количества серы. Таким образом, смешивание этанола с бензином способствует сокращению содержания серы в топливе и тем самым снижает выбросы окислов серы, компонента кислотных дождей и канцерогена.

Биодизель

Биодизель получают путем смешивания растительного масла или животного жира со спиртом и катализатором посредством химического процесса, называемого *трансэтерификацией*. Масло для производства биодизеля может быть получено практически

из любых масличных культур; наиболее распространенными в мире источниками являются рапс в Европе и соя в Бразилии и Соединенных Штатах Америки. В тропических и субтропических странах биодизель получают из пальмового, кокосового масла и масла яatroфы. Для производства биодизеля также используются небольшие количества животного жира, остающегося после переработки рыбы и животных продуктов. В производственном процессе обычно вырабатываются дополнительные побочные продукты, например, жмых размолотых бобов (животный корм) и глицерин. Поскольку основу для биодизеля могут составлять самые разные масла, полученное топливо может обладать более широким по сравнению с этанолом спектром физических свойств, таких как вязкость и воспламеняемость.

Биодизель может смешиваться с традиционным дизельным топливом или сжигаться в чистом виде в двигателях с воспламенением от сжатия. Его энергоемкость составляет 88–95 процентов от дизельного топлива, однако оно улучшает смазывающую способность дизеля и увеличивает цетановое число, обеспечивая общую сопоставимость обоих видов топлива по экономичности. Более высокое содержание кислорода в биодизеле способствует более полному сгоранию топлива, уменьшая выбросы аэрозольных загрязнителей, окиси углерода и углеводородов. Как и в случае этанола, биодизель содержит лишь ничтожное количество серы, тем самым уменьшая автомобильные выбросы окислов серы.

Неразбавленное растительное масло

Неразбавленное растительное масло⁴ является потенциальным топливом для дизельных двигателей, которое может быть получено из различных источников, в том числе масличных культур, например, рапса, подсолнечника, сои и пальмы. Использованный кулинарный жир из ресторанов и животный жир, поступающий с мясокомбинатов, также может использоваться в качестве топлива для дизельных транспортных средств.

Сырье для биотоплива

Существует множество источников биомассы для целей энергетики, рассредоточенных по

⁴ Оно также называется чистым растительным маслом.

ВСТАВКА 1

Другие виды биомассы для обогрева, электроэнергетики и транспорта**Биомасса для обогрева и производства электроэнергии**

Целый ряд ресурсов биомассы используется для производства электроэнергии и обогрева посредством сжигания. К источникам относятся различные формы отходов, например, остатки агропромышленной отрасли, остатки после сбора урожая на полях, навоз животного происхождения, древесные отходы лесного хозяйства и промышленности, отходы пищевой и целлюлозно-бумажной промышленности, городские твердые отходы, осадки сточных вод и биогаз от сбраживания сельскохозяйственных и других органических отходов. Также используются специальные энергетические культуры, например, многолетники с коротким вегетационным периодом (эвкалипт, тополь, ива) и травы (мискантус и просо прутьевидное).

Для производства электроэнергии могут использоваться несколько процессов. Большинство электроэнергии из биомассы получают с использованием процесса парового цикла: биомассу сжигают в бойлере, чтобы получить пар высокого давления, который проходит через ряд аэродинамических лопастей, заставляя турбину вращаться, а она, в свою

очередь, вращает соединенный с ней генератор, производя электроэнергию. Прессованные формы биомассы, например, древесные гранулы и брикеты, также могут использоваться для сжигания. Помимо этого, биомасса может сжигаться с углем в бойлере обычной электростанции для получения пара и электроэнергии. Последний способ в настоящее время является наиболее экономически эффективным методом включения технологии возобновляемых источников энергии в традиционный процесс выработки энергии, поскольку большая часть существующей инфраструктуры электростанций может использоваться без серьезных модификаций.

Биогаз для обогрева, электроэнергетики и транспорта**Анаэробное сбраживание**

Биогаз может получаться посредством *анаэробного сбраживания* пищевых отходов или отходов животного происхождения в присутствии бактерий в условиях кислородного голодания. Полученный биогаз содержит значительную объемную долю метана, а также двуокиси углерода, и может использоваться для обогрева или производства электроэнергии в модифицированном двигателе внутреннего

обширным и разнообразным географическим регионам. Даже сегодня большая часть энергии, получаемой из биомассы, которая используется в качестве топлива, производится из побочной продукции или отходов производства продовольствия, кормов и волокон. Например, основные побочные продукты лесной промышленности используются для производства топливной древесины и древесного угля, а черный щелок (побочный продукт целлюлозных заводов) является основным топливом для получения биоэлектроэнергии в таких странах как Бразилия, Канада, Финляндия, Швеция и Соединенные Штаты Америки. Значительные объемы теплоэнергии получают из регенерированной и/или переработанной древесной биомассы, и все большее количество энергии извлекается из биомассы с пахотных земель (солома и стебли

хлопчатника) и лесных угодий (древесная щепа и гранулы). В странах, производящих сахар и кофе, для прямого сжигания, а также для производства тепловой энергии и пара используются багасса и кофейная скорлупа.

В плане биоэнергии, однако, сферой интенсивного роста стало в последние годы производство жидкого биотоплива для транспорта с использованием сельскохозяйственных культур в качестве сырья. Основную часть этого топлива составляют этанол, получаемый из сахароносных или крахмалистых культур, и биодизель, получаемый из масличных культур.

Как показано на рисунке 6, в качестве сырья для производства этанола и биодизеля может применяться целый ряд различных сельскохозяйственных культур. Большая часть мирового производства этанола приходится,

сгорания. Переработка отходов животного происхождения и навоза в метан/биогаз может приносить значительную пользу экологии и здравоохранению. Метан является парниковым газом, который обладает потенциалом стимулировать глобальное потепление, который в 22–24 раза превышает соответствующий показатель двуокиси углерода. При улавливании и утилизации метана удается избежать его воздействия как парникового газа. Кроме того, тепло, выделяемое в процессе биосбраживания, уничтожает патогенные организмы, присутствующие в навозе, и материал, остающийся в конце процесса, представляет собой ценное удобрение.

Газификация

За счет процесса *газификации* твердая биомасса может быть превращена в топливный газ или биогаз. Принцип действия газификаторов биомассы заключается в нагревании биомассы в среде с низким содержанием кислорода до высокой температуры, при которой она распадается с выделением горючего, богатого энергией синтез-газа, или «сингаза». Этот газ может сжигаться в обычном бойлере или использоваться

вместо природного газа в газовой турбине для вращения электрогенераторов. Биогаз, получаемый посредством газификации, может фильтроваться, чтобы удалить нежелательные химические соединения, и использоваться в эффективных системах генерации электроэнергии «комбинированного цикла», в которых для производства электроэнергии объединены паровые и газовые турбины.

Биогаз для транспорта

Необработанный биогаз непригоден в качестве транспортного топлива из-за низкого содержания метана (60–70 процентов) и высокой концентрации примесей. Тем не менее, его можно обработать, с тем чтобы удалить двуокись углерода, воду и агрессивный сероводород, а также увеличить содержание в нем метана (до более 95 процентов). После сжатия обработанный биогаз обладает свойствами, подобными сжатому природному газу, делая его пригодным для использования на транспорте.

Источник: на основании данных Глобального биоэнергетического партнерства (GBEP, 2007).

однако, на сахарный тростник или кукурузу; в Бразилии основная масса этанола производится из сахарного тростника, а в Соединенных Штатах Америки — из кукурузы. К другим значимым культурам относятся маниока, рис, сахарная свекла и пшеница. Наиболее популярным сырьем для получения биодизеля являются рапс (в странах ЕС), соя (в Соединенных Штатах Америки и Бразилии), а также пальмовое, кокосовое и касторовое масло (в тропических и субтропических странах), интерес возрастает также к ятрофе.

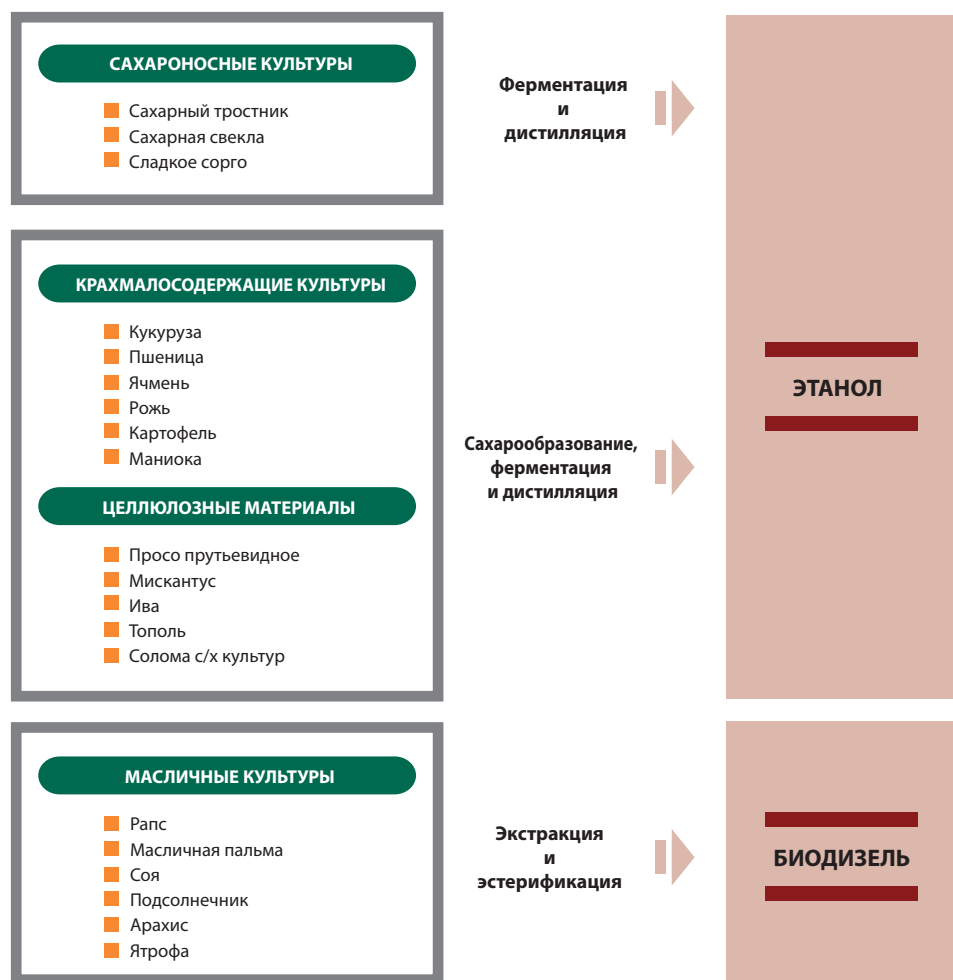
Биотопливо и сельское хозяйство

Нынешнее расширение и рост энергетических рынков в результате проведения новой энергетической и экологической политики,

принятой в последнее десятилетие в большинстве развитых стран и в нескольких развивающихся странах, изменяет роль сельского хозяйства. Наиболее значимым является повышение роли сектора как поставщика сырья для производства жидкого транспортного биотоплива — этанола и биодизеля. Современная биоэнергия представляет собой новый источник спроса на продукцию фермеров, сулящий формирование доходов и создание рабочих мест. Вместе с тем, возникает рост соперничества за природные ресурсы, в частности землю и воду, особенно в краткосрочной перспективе, хотя в более долгосрочной перспективе увеличение урожаев способно смягчить такое соперничество. Соперничество за землю становится серьезной проблемой, особенно когда некоторые виды растений (например, кукуруза, масличная пальма и соя), которые

РИСУНОК 6

Преобразование сельскохозяйственного сырья в жидкое биотопливо



Источник: ФАО.

в настоящее время культивируются с целью производства продовольствия и кормов, начинают использоваться для выработки биотоплива или когда сельскохозяйственные земли, предназначенные для выращивания продовольственных культур, переориентируются на получение биотоплива.

В настоящее время примерно 85 процентов мирового производства жидкого биотоплива составляет этанол (таблица 1). Два крупнейших производителя этанола — Бразилия и Соединенные Штаты Америки — обеспечивают почти 90 процентов от совокупного производства, а остальная часть приходится главным образом на Канаду, Китай, ЕС (в основном на Францию и Германию) и Индию. Производство биодизеля в основном сосредоточено в ЕС (примерно 60 процентов

от совокупного объема), значительно меньшая его доля вырабатывается в Соединенных Штатах Америки. В Бразилии производство биодизеля началось совсем недавно, и объемы производства остаются ограниченными. К другим значимым производителям биодизеля относятся Китай, Индия, Индонезия и Малайзия.

Как показано в таблице 2, выход биотоплива на гектар для различных сельскохозяйственных культур широко варьируется в зависимости от вида сырья, страны и системы производства. Такие колебания показателей объясняются разницей в урожайности культур на гектар, зависящей от самих культур и стран, а также неравноценной эффективностью переработки различных культур. Это означает, что потребности в земельных площадях для расширяющегося производства биотоплива будут резко

различаться в зависимости от культуры и места выращивания. В настоящее время производство этанола из сахарного тростника и сахарной свеклы дает самые высокие показатели, причем на первом месте по выходу биотоплива на гектар стоит производство на основе сахарного тростника в Бразилии, от которой лишь незначительно отстает Индия. Несколько ниже выход биотоплива на гектар для кукурузы, но для этого показателя характерны заметные различия, например, в Китае и Соединенных Штатах Америки. Данные, представленные в таблице 2, относятся только к технической производительности. Стоимость производства биотоплива на основе различных культур в разных странах может обнаруживать самые разные закономерности. Более подробно этот вопрос рассматривается в главе 3.

Жизненный цикл биотоплива: энергетический баланс и выбросы парниковых газов

Двумя главными побудительными причинами внедрения политики по стимулированию разработки биотоплива были вопросы энергетической безопасности и стремление сократить выбросы парниковых газов. Подобно тому, как для различных культур характерны разные выходы биотоплива на гектар площади, показатели энергетического

баланса и сокращения выбросов парниковых газов также в значительной степени изменяются в зависимости от сырья, местоположения и технологий.

Вклад биотоплива в энергообеспечение зависит от энергоемкости биотоплива и энергии, затрачиваемой на его производство. Последнее включает энергию, необходимую для выращивания и сбора сырья, его переработки в биотопливо, а также для транспортировки сырья и полученного биотоплива на различных стадиях производства и распределения. Энергетический баланс ископаемого топлива отражает отношение энергии, заключенной в биотопливе, к энергии ископаемого топлива, использованного для его производства. Энергетический баланс ископаемого топлива равный 1 означает, что на производство литра биотоплива требуется столько же энергии, сколько он содержит; иными словами, биотопливо не приводит к чистому приросту или потере энергии. Энергетический баланс ископаемого топлива равный 2 означает, что литр биотоплива содержит вдвое больше энергии, чем необходимо для его производства. Проблема точной оценки энергетических балансов связана со сложностью четкого определения граничных условий системы для проведения анализа.

На рисунке 7 приведены результаты нескольких исследований энергетического баланса ископаемого топлива для различных видов топлива по данным Института всемирной вахты

ТАБЛИЦА 1
Объем производства биотоплива по странам в 2007 г.

СТРАНА/ГРУППА СТРАН	ЭТАНОЛ		БИОДИЗЕЛЬ		ИТОГО	
	(млн. литров)	(млн. т.н.э.)	(млн. литров)	(млн. т.н.э.)	(млн. литров)	(млн. т.н.э.)
Бразилия	19 000	10,44	227	0,17	19 227	10,60
Канада	1 000	0,55	97	0,07	1 097	0,62
Китай	1 840	1,01	114	0,08	1 954	1,09
Индия	400	0,22	45	0,03	445	0,25
Индонезия	0	0,00	409	0,30	409	0,30
Малайзия	0	0,00	330	0,24	330	0,24
Соединенные Штаты Америки	26 500	14,55	1 688	1,25	28 188	15,80
Европейский союз	2 253	1,24	6 109	4,52	8 361	5,76
Другие страны	1 017	0,56	1 186	0,88	2 203	1,44
Весь мир	52 009	28,57	10 204	7,56	62 213	36,12

Примечание: представленные данные подлежат округлению.
Источник: по материалам F.O. Licht, 2007, и базы данных AgLink-Cosimo ОЭСР-ФАО.

ТАБЛИЦА 2
Выход биотоплива по видам сырья и странам

С/Х КУЛЬТУРА	ОБЩЕМИРОВЫЕ ОЦЕНКИ/ ОЦЕНКИ ПО СТРАНАМ	БИОТОПЛИВО	УРОЖАЙНОСТЬ	ЭФФЕКТИВНОСТЬ	ВЫХОД
			КУЛЬТУРЫ	ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	БИОТОПЛИВА
			(тонны/га)	(литры/тонна)	(литры/га)
Сахарная свекла	Общемировые	Этанол	46,0	110	5 060
Сахарный тростник	Общемировые	Этанол	65,0	70	4 550
Маниока	Общемировые	Этанол	12,0	180	2 070
Кукуруза	Общемировые	Этанол	4,9	400	1 960
Рис	Общемировые	Этанол	4,2	430	1 806
Пшеница	Общемировые	Этанол	2,8	340	952
Сорго	Общемировые	Этанол	1,3	380	494
Сахарный тростник	Бразилия	Этанол	73,5	74,5	5 476
Сахарный тростник	Индия	Этанол	60,7	74,5	4 522
Масличная пальма	Малайзия	Биодизель	20,6	230	4 736
Масличная пальма	Индонезия	Биодизель	17,8	230	4 092
Кукуруза	Соединенные Штаты Америки	Этанол	9,4	399	3 751
Кукуруза	Китай	Этанол	5,0	399	1 995
Маниока	Бразилия	Этанол	13,6	137	1 863
Маниока	Нигерия	Этанол	10,8	137	1 480
Соя	Соединенные Штаты Америки	Биодизель	2,7	205	552
Соя	Бразилия	Биодизель	2,4	205	491

Источники: Rajagopal *et al.*, 2007 — общемировые данные; Naylor *et al.*, 2007 — данные по странам.

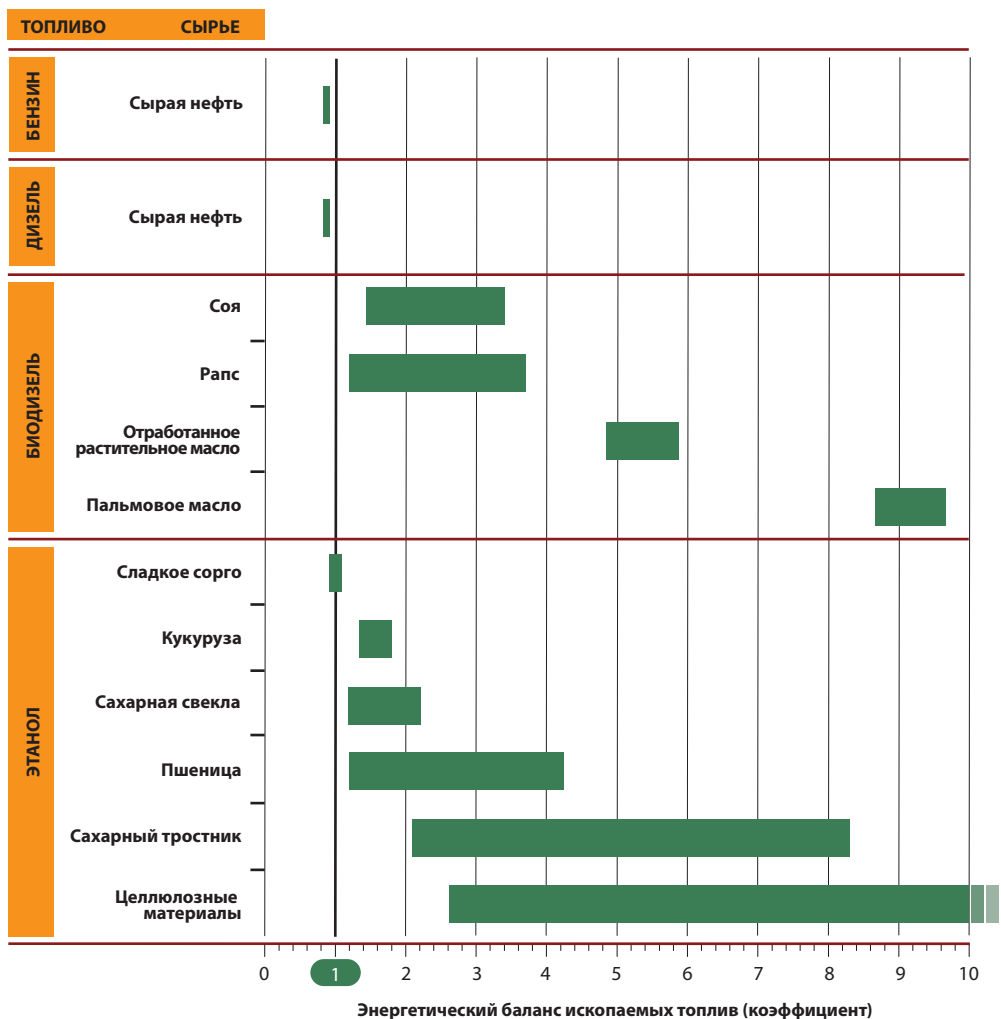
(Worldwatch Institute, 2006). На рисунке отражен широкий диапазон оценок энергетического баланса ископаемого топлива по сырью и видам топлива, а в некоторых случаях по сочетанию сырья/топливо в зависимости от таких факторов как урожайность сырья, сельскохозяйственная практика и технологии переработки.

Для обычного бензина и дизельного топлива энергетический баланс ископаемого топлива составляет примерно 0,8–0,9, поскольку часть энергии уходит на перегонку сырой нефти в пригодное к употреблению топливо и на его транспортировку на рынки. Если энергетический баланс ископаемого топлива для биотоплива превышает данные показатели, то это способствует снижению зависимости от ископаемого топлива. В этом отношении все виды биотоплива вносят явно позитивный вклад, хотя и в различной степени. Примерный энергетический баланс ископаемого

топлива для биодизеля колеблется в пределах от 1 до 4 для сырья из подсолнечника, рапса и сои. Примерный энергетический баланс для пальмового масла выше — около 9, поскольку другие масличные культуры необходимо дробить перед выжимкой масла, а это является дополнительной стадией переработки, требующей затрат энергии. Для этанола, производимого из сельскохозяйственных культур, оценки энергетического баланса меняются в пределах от менее 2 (кукуруза) до 2–8 (сахарный тростник). Благоприятный энергетический баланс этанола из сахарного тростника, производимого в Бразилии, в отношении ископаемого топлива зависит не только от урожайности сырья, но и от того факта, что оно перерабатывается с использованием остатков биомассы сахарного тростника (багассы) в качестве вводимого энергоресурса. Диапазон предположительных балансов целлюлозного сырья в отношении

РИСУНОК 7

Предположительные пределы энергетических балансов ископаемых топлив по отдельным видам топлива



Примечание: Коэффициенты целлюлозного биотоплива носят теоретический характер.

Источники: по материалам Института всемирной вахты, (Worldwatch Institute, 2006), таблица 10.1; Rajagopal and Zilberman, 2007.

ископаемого топлива еще шире, что отражает неопределенность такой технологии и разнообразие возможных видов сырья и систем производства.

Аналогичным образом чистый эффект воздействия биотоплива на выбросы парниковых газов может существенно варьироваться. Биотопливо производится из биомассы и поэтому теоретически должно иметь нейтральный уровень эмиссии углерода, так как его сжигание лишь возвращает в атмосферу углерод, изъятый растениями из атмосферы в процессе их роста (в отличие от ископаемых видов топлива, которые

высвобождают углерод, хранившийся миллионы лет под земной поверхностью). Тем не менее, оценка суммарного воздействия биотоплива на выбросы парниковых газов требует анализа выбросов в течение всего жизненного цикла биотоплива: посев и уборка урожая сельскохозяйственных культур; переработка сырья в биотопливо; транспортировка сырья и конечного топлива; хранение, распределение и розничная продажа биотоплива, включая воздействие заправки транспортного средства горючим и выбросы в результате сгорания. Кроме того, следует учитывать любые возможные побочные

продукты, которые могут сокращать выбросы. Поэтому совершенно ясно, что энергетический баланс ископаемого топлива является лишь одним из нескольких определяющих факторов воздействия биотоплива на выбросы. Важнейшие факторы, связанные с процессом сельскохозяйственного производства, включают использование удобрений, пестицидов, технологии орошения и обработку почвы. Изменения в характере землепользования, связанные с расширением производства биотоплива, могут оказывать существенное воздействие. Например, преобразование лесных площадей с целью производства сельскохозяйственных культур для биотоплива или замена сельскохозяйственных культур сырьем для биотоплива в иных местах может привести к высвобождению большого количества углерода, и потребуются годы, чтобы восстановить исходное состояние за счет снижения выбросов в результате замены ископаемого топлива биотопливом. В главе 5 более подробно рассматривается взаимосвязь между биотопливом и выбросами парниковых газов и изучаются фактические данные, свидетельствующие о том, что воздействие биотоплива на изменение климата может быть различным и не обязательно положительным либо не настолько положительным, как это нередко предполагалось изначально.

Жидкое биотопливо второго поколения⁵

Современное производство жидкого биотоплива на основе сахароносных и крахмалистых культур (в случае этанола) и масличных культур (в случае биодизеля) обычно называют производством биотоплива первого поколения. Второе поколение разрабатываемых технологий может также сделать возможным использование лигноцеллюлозной биомассы. Целлюлозная биомасса более устойчива к расщеплению, чем крахмал, сахар и масло. Сложность ее преобразования в жидкое топливо делает технологию переработки более дорогостоящей, хотя собственно затраты на целлюлозное сырье меньше, чем на существующее в настоящее время сырье первого поколения. Переработка целлюлозы в этанол включает две стадии:

вначале целлюлозный и гемицеллюлозный компоненты биомассы расщепляются до сахаров, которые затем ферментируются для получения этанола. Первая стадия технически очень сложна, хотя ведется разработка эффективных и экономичных способов осуществления этого процесса. Отсутствие коммерческой жизнеспособности препятствует пока что широкому производству биотоплива второго поколения на основе целлюлозы.

Целлюлозная биомасса является наиболее распространенным биологическим материалом на Земле, поэтому успешная разработка коммерчески жизнеспособного биотоплива второго поколения на основе целлюлозы может существенно расширить объем и разнообразие сырья, которое может быть использовано для производства. Потенциальным источником являются все целлюлозные отходы, в том числе отходы сельского хозяйства (солома, стебли, листья) и лесоводства, отходы переработки (ореховая скорлупа, багасса сахарного тростника, опилки) и органические компоненты городских отходов. Однако столь же важно принять во внимание особую роль, которую разлагающаяся биомасса играет в сохранении плодородия и структуры почвы; чрезмерное ее извлечение для получения биоэнергии может иметь негативные последствия.

Специальные целлюлозные энергетические культуры весьма перспективны в качестве источника сырья для технологий второго поколения. В число таких потенциальных культур входят древесные культуры с коротким вегетационным периодом, например, ива, гибридный тополь и эвкалипт, или травянистые виды, например, мискантус, просо прутьевидное и канареечник тростниковидный. Эти культуры имеют существенные преимущества в сравнении с культурами первого поколения в плане их экологической устойчивости. По сравнению с традиционными крахмалистыми и масличными культурами они способны производить больше биомассы на гектар земли, поскольку в качестве сырья для переработки в топливо может использоваться все растение. Более того, некоторые быстрорастущие многолетники, например, древесные культуры с коротким вегетационным периодом и высокотравье, иногда могут произрастать на бедных, истощенных почвах, где выращивание продовольственных культур невыгодно из-за эрозии или других ограничений. Оба этих фактора могут снизить соперничество за земельные площади с

⁵ В основу настоящего раздела положены материалы Глобального партнерства в области биоэнергии (GBEP, 2007), МЭА (IEA, 2004) и работа Rutz and Janssen (2007).

производителями продовольствия и кормов. Отрицательным моментом является то, что некоторые из этих видов считаются инвазивными или потенциально инвазивными и могут оказывать негативное воздействие на водные ресурсы, биоразнообразие и сельское хозяйство.

Сырье и биотопливо второго поколения также могут оказаться полезными в плане уменьшения выбросов парниковых газов. В большинстве исследований прогнозируется, что будущие, более совершенные, виды топлива, производимого из многолетних культур, а также древесных и сельскохозяйственных отходов, могут резко сократить выбросы парниковых газов, связанные с жизненным циклом нефтяного топлива и биотоплива первого поколения. Это обусловлено более высоким выходом энергии на гектар и выбором другого топлива для процесса переработки. В современном процессе производства этанола энергия, используемая для переработки, практически во всех случаях извлекается из ископаемого топлива (за исключением этанола, получаемого в Бразилии из сахарного тростника, где большая часть энергии для переработки обеспечивается за счет жмыха сахарного тростника). В случае биотоплива второго поколения энергию для переработки можно обеспечивать за счет остатков растений (главным образом лигнина).

Несмотря на то, что целлюлозная биомасса сложнее поддается расщеплению для преобразования в жидкое топливо, она обладает большей устойчивостью при транспортировке, что способствует сокращению затрат на ее перевозку и поддержание качества по сравнению с продовольственными культурами. Ее также проще хранить, особенно в сравнении с сахароносными культурами, поскольку она устойчива к порче. С другой стороны, целлюлозная биомасса нередко может быть объемной, поэтому для ее доставки на перерабатывающие предприятия после сбора урожая потребуются хорошо развитая транспортная инфраструктура.

Предстоит еще решить значительные технологические проблемы, чтобы сделать производство этанола из лигноцеллюлозного сырья коммерчески конкурентоспособным. По-прежнему остается неясным, когда именно переработка целлюлозной биомассы в усовершенствованное топливо

сможет обеспечивать существенную часть общемирового жидкого топлива. Сегодня в мире существует несколько экспериментальных и демонстрационных установок, действующих или находящихся в стадии разработки. Темпы распространения методов биохимической или термохимической переработки будут зависеть от развития и успешной реализации разрабатываемых экспериментальных проектов, устойчивого финансирования исследований, а также от мировых цен на нефть и инвестиций частного сектора.

Итак, биотопливо второго поколения на основе лигноцеллюлозного сырья являет собой совершенно иную картину в плане его значения для сельского хозяйства и продовольственной безопасности. Оно позволяет применять самое разнообразное сырье помимо сельскохозяйственных культур, используемых в настоящее время в технологиях первого поколения, и значительно повысить энергетический выход на гектар. Воздействие этого вида топлива на товарные рынки, изменение характера землепользования и окружающую среду будет также иным, равно как и его влияние на будущие технологии производства и переработки (см. вставку 2).

Потенциальные возможности биоэнергии

Каковы потенциальные возможности производства биоэнергии? Технический и экономический потенциал биоэнергии следует рассматривать в контексте усиливающихся потрясений и нагрузок на мировое сельское хозяйство, а также в свете растущего спроса на продовольствие и сельскохозяйственную продукцию в результате непрерывного роста населения и доходов во всем мире. То, что возможно производить с технической точки зрения, может оказываться экономически нежизнеспособным или экологически неустойчивым. В настоящем разделе более подробно обсуждается технический и экономический потенциал биоэнергии.

Поскольку биоэнергия извлекается из биомассы, мировой потенциал такой энергии в конечном счете ограничивается совокупным объемом энергии, произведенной в результате глобального фотосинтеза. Растения получают суммарную энергию, эквивалентную примерно 75 000 млн. т.н.э. (3 150 экзаджоулей) в год

ВСТАВКА 2

Биотехнологические приложения для биотоплива

Многие из существующих биотехнологий могут применяться для совершенствования выработки энергии из биотоплива, например, разработка более эффективного сырья для биомассы и повышение эффективности переработки биомассы в биотопливо.

Биотехнологии производства биотоплива первого поколения

Виды растений, которые в настоящее время используются для производства биотоплива первого поколения, выбирались по своим агрономическим характеристикам, важным для производства продуктов питания и/или кормов, а не по свойствам, которые делают их полезными для использования в качестве сырья для производства биотоплива. Биотехнология может помочь ускорить выбор видов, которые наиболее пригодны для производства биотоплива — с увеличением биомассы на гектар, повышенным содержанием масел (культуры для биодизеля) или ферментируемых сахаров (культуры для этанола), или улучшенными характеристиками для переработки, которые облегчают их преобразование в биотопливо. Область геномики, то есть исследования всего генетического материала организма

(его генома), скорее всего, будет играть все более важную роль. Последовательности генома для некоторых видов сырья первого поколения, например, кукурузы, сорго и сои, находятся в стадии расшифровки или уже опубликованы. Кроме геномики, к другим биотехнологиям, которые могут применяться, относятся селекция с помощью маркеров и генетическая модификация.

Ферментация сахаров является основой производства этанола из биомассы. Однако наиболее широко используемый микроорганизм для промышленной ферментации — дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* — не в состоянии осуществлять прямую ферментацию крахмалистого материала, например, кукурузного крахмала. Биомассу необходимо разложить (гидролизовать) на ферментируемые сахара с помощью ферментов, называемых амилазами. Многие из применяемых в настоящее время производимых промышленностью ферментов, в том числе амилазы, получают с использованием генетически модифицированных микроорганизмов. Продолжаются исследования по разработке эффективных генетических штаммов дрожжей, которые могут сами вырабатывать амилазы, с тем

(Карур, 2004), что в шесть или семь раз больше текущей мировой потребности в энергии. Однако сюда включаются огромные количества биомассы, которая не может быть собрана. С чисто физической точки зрения биомасса представляет собой сравнительно нерациональный способ извлечения солнечной энергии, особенно по сравнению со все более эффективными солнечными батареями (FAO, 2006а).

В ряде исследований оценивается объем биомассы, которая технически способна внести вклад в общемировое энергоснабжение. Эти оценки существенно варьируются из-за различных масштабов, допущений и методологий, что подчеркивает высокую степень неопределенности относительно возможного вклада биоэнергии в общемировое энергообеспечение. По оценкам авторов последнего крупного исследования проблем

биоэнергии, проведенного Международным энергетическим агентством (МЭА) на основе существующих работ, объем потенциальных поставок биоэнергии в 2050 году колеблется от минимального значения в 1 000 млн. т.н. э. до предельной величины в 26 200 млн. т.н.э. (IEA, 2006, стр. 412–416). Последний показатель опирается на предположение об исключительно быстром технологическом прогрессе; однако МЭА отмечает, что 6 000–12 000 млн. т.н.э. были бы более реалистичным показателем, основанным на более медленном росте урожайности. Согласно подсчетам МЭА, для получения примерно 9 500 млн. т.н.э. биоэнергии потребовалось бы, по умеренной оценке, выделить под производство биомассы примерно пятую часть мировых сельскохозяйственных площадей.

Гораздо более важным, чем чисто техническая жизнеспособность, является

чтобы можно было объединить стадии гидролиза и ферментации.

Применение биотехнологии для биотоплива второго поколения

Лигноцеллюлозная биомасса состоит в основном из лигнина и полисахаридов целлюлозы (образованных гексозными сахарами), а также гемицеллюлозы (содержащей смесь гексозных и пентозных сахаров). По сравнению с производством этанола из сырья первого поколения, использование лигноцеллюлозной биомассы в большей степени затруднено, поскольку полисахариды более стабильны и пентозные сахара не столь легко подвергаются ферментации *Saccharomyces cerevisiae*. Для переработки лигноцеллюлозной биомассы в биотопливо полисахариды необходимо гидролизовать или разложить на более простые сахара с помощью кислот или ферментов. Для разрешения этих проблем используется ряд биотехнологических методов, в том числе разработка штаммов *Saccharomyces cerevisiae*, которые в состоянии ферментировать пентозные сахара, использование альтернативных видов дрожжей, которые естественным образом ферментируют пентозные сахара, а также

инженерия ферментов, которые в состоянии разрушать целлюлозу и гемицеллюлозу на простые сахара.

Кроме сельскохозяйственных, лесных и других побочных продуктов, основным источником лигноцеллюлозной биомассы для биотоплива второго поколения, скорее всего, будет «специальное сырье для биомассы», например, определенные виды многолетних трав и лесных деревьев. Геномика, генетическая модификация и другие биотехнологии исследуются на предмет их применения в качестве инструмента для выращивания растений с желаемыми характеристиками для производства биотоплива второго поколения, например, растений, которые содержат меньшее количество лигнина (соединения, которое не подвергается ферментации в жидкое биотопливо), которые сами продуцируют ферменты для распада целлюлозы и/или лигнина, или которые продуцируют повышенное количество целлюлозы, или выход всей биомассы в целом.

Источники: на основании данных ФАО (FAO, 2007а), и Королевского общества (The Royal Society, 2008).

вопрос о том, какая часть технически доступного потенциала биоэнергии была бы экономически жизнеспособной. Долгосрочный экономический потенциал существенным образом зависит от допущений, связанных с ценами на энергию ископаемого топлива, разработки сельскохозяйственного сырья и будущих технологических нововведений в области сбора урожая, переработки и использования биотоплива. Эти аспекты более подробно обсуждаются в главе 3.

Другой способ рассмотрения потенциальных возможностей производства биотоплива заключается в изучении сравнительных потребностей в землепользовании. В своем справочном сценарии на 2030 год, приведенном в *Перспективах мировой энергетики* за 2006 год, МЭА прогнозирует увеличение доли мировых пахотных земель, отводимых под выращивание биомассы

для жидкого биотоплива, с 1 процента в 2004 году до 2,5 процента в 2030 году. В сценарии альтернативной политики эта доля увеличивается в 2030 году до 3,8 процента. В обоих случаях прогнозы основаны на предположении о том, что жидкое биотопливо будет производиться с использованием традиционных сельскохозяйственных культур. Если до 2030 года произойдет широкая коммерциализация жидкого биотоплива второго поколения, то МЭА прогнозирует, что общемировая доля биотоплива на транспортные потребности возрастет до 10 процентов, а не до 3 процентов, как предусмотрено в справочном сценарии, и не до 5 процентов по сценарию альтернативной политики. Потребности в землепользовании возрастут лишь незначительно — до 4,2 процента от общей площади пахотных земель — из-за более высокого выхода энергии

ТАБЛИЦА 3

Гипотетический потенциал получения этанола из основных зерновых и сахароносных культур

С/Х КУЛЬТУРА	ОБЩЕМИРОВАЯ ПЛОЩАДЬ (млн. га)	ОБЩЕМИРОВОЕ ПРОИЗВОДСТВО (млн. тонн)	ВЫХОД БИОТОПЛИВА (литры/га)	МАКСИМАЛЬНЫЙ ОБЪЕМ ЭТАНОЛА (млрд. литров)	БЕНЗИНОВЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ (млрд. литров)	ПОСТАВКИ: ДОЛЯ ОБЩЕМИРОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ БЕНЗИНА В 2003 Г. ¹ (проценты)
Пшеница	215	602	952	205	137	12
Рис	150	630	1 806	271	182	16
Кукуруза	145	711	1 960	284	190	17
Сорго	45	59	494	22	15	1
Сахарный тростник	20	1 300	4 550	91	61	6
Маниока	19	219	2 070	39	26	2
Сахарная свекла	5.4	248	5 060	27	18	2
Итого	599	940	630	57

Примечание: ... = неприменимо. Представленные данные подлежат округлению.

¹ Общемировое потребление бензина в 2003 г. = 1 100 млрд. литров (Kim and Dale, 2004).

Источник: Rajagopal *et al.*, 2007.

на гектар и использования биомассы отходов для производства топлива. Тем не менее, это показывает, что даже в сценарии для второго поколения гипотетическая масштабная замена бензина, который получают из ископаемого топлива, на жидкое биотопливо потребует существенного преобразования земель. Более подробное обсуждение, в том числе последствий для регионов, приводится в главе 4.

Потенциальные возможности биотоплива, производимого с применением существующих технологий, заменить собой ископаемое топливо также наглядно иллюстрируют в своей работе с помощью гипотетического расчета Rajagopal *et al.* (2007). Они приводят теоретические оценки общемирового производства этанола из основных зерновых и сахароносных культур, проведенные на основе среднемировой урожайности, и обычно представляемую информацию, об эффективности преобразования. Результаты оценок обобщены в таблице 3. На приведенные культуры приходится 42 процента всех существующих земель сельскохозяйственного назначения. Переработка всей продукции растениеводства в этанол заменила бы 57 процентов совокупного потребления бензина. Согласно более реалистичному допущению о переориентации на производство этанола 25 процентов каждой из этих культур этанолом можно было бы заменить всего 14 процентов потребления бензина.

Различные гипотетические расчеты подчеркивают, что в связи со значительными потребностями в земельных площадях для производства биотоплива, его применение приведет, как можно ожидать, лишь к очень ограниченному вытеснению ископаемого топлива. Тем не менее, даже весьма скромный вклад биотоплива в совокупные энергоресурсы может оказать мощное воздействие на сельское хозяйство и сельскохозяйственные рынки.

Основные положения главы

- Биоэнергия обеспечивает примерно 10 процентов общемировых энергоресурсов. Основная ее часть производится за счет традиционной необработанной биомассы, однако все большее значение приобретает коммерческая биоэнергия.
- Жидкие виды биотоплива для транспорта привлекают наибольшее внимание, и в этой сфере наблюдается быстрый рост производства. Тем не менее, с количественной точки зрения их роль весьма незначительна: они обеспечивают 1 процент совокупного потребления транспортного топлива и 0,2–0,3 процента совокупного энергопотребления во всем мире.
- Основными видами жидкого биотоплива являются этанол и биодизель. Их можно производить из самого разного сырья.

- Наиболее значимыми производителями этанола являются Бразилия и Соединенные Штаты Америки, а биодизеля — ЕС.
- В современных технологиях производства жидкого биотоплива в качестве сырья используются сельскохозяйственные продукты. Этанол производится на основе сахароносных или крахмалистых культур, причем самые значительные его объемы изготавливаются из сахарного тростника в Бразилии и кукурузы в Соединенных Штатах Америки. Биодизель получают из целого ряда различных масличных культур.
 - Крупномасштабное производство биотоплива предполагает огромные потребности в земельных площадях для выращивания сырья. С учетом этого можно ожидать, что жидкое биотопливо заменит ископаемое топливо для транспорта лишь в очень ограниченных масштабах.
 - Несмотря на то, что жидкое биотопливо обеспечивает лишь небольшую долю общемировых потребностей в энергии, оно, тем не менее, потенциально может оказать значительное воздействие на мировое сельское хозяйство и сельскохозяйственные рынки из-за объема производимого сырья и использования соответствующих земельных площадей, необходимых для его производства.
 - Вклад различных видов биотоплива в сокращение потребления ископаемого топлива значительно варьируется, если учесть энергию ископаемого топлива, используемую в качестве одного из вводимых ресурсов для их производства. Энергетический баланс ископаемого топлива относительно биотоплива зависит от таких факторов как характеристики сырья, местоположение производства, сельскохозяйственная практика и источник энергии, используемый в процессе переработки. Различные виды биотоплива вносят далеко не одинаковый вклад в сокращение выбросов парниковых газов.
 - Для производства биотоплива второго поколения, разработка которого ведется в настоящее время, будет использоваться лигноцеллюлозное сырье, например, древесина, высокотравье, а также отходы лесоводства и пожнивные остатки. Это повысит количественный потенциал получения биотоплива с гектара земли, а также может улучшить энергетический баланс биотоплива относительно ископаемого топлива и его способность снижать выбросы парниковых газов. Однако пока неизвестно, когда такие технологии будут внедрены в производство в значительных коммерческих масштабах.