

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ РОЛИ ДЛЯ БИОМАССЫ В ПРЕОДОЛЕНИИ ПАРНИКОВОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Д.О. Холл, Х.Е. Майник и Р.Х. Уильямс

Замена ископаемого топлива на непрерывно выращиваемую биомассу, преобразуемую с помощью современных технологий в полезную энергию, резко сократило бы поступление CO_2 в атмосферу. Такое использование биомассы для замены ископаемого топлива оказалось бы гораздо более эффективным с точки зрения уменьшения содержания атмосферного CO_2 по сравнению с удержанием углерода в деревьях. Чтобы придать биомассе значительную энергетическую роль, потребуется некая перестройка в промышленности. Однако надежды на то, что электричество и жидкое топливо из биомассы часто могут оказаться дешевле, нежели от угля и нефти, делают эту стратегию преодоления парникового потепления по существу более легкой для реализации по сравнению со многими другими альтернативами.

Д.О. Холл и Х.Е. Майник работают в отделе наук о биосфере Лондонского королевского колледжа, Кампден Хилл Роад, Лондон W8 7АН, Великобритания, а Р.Х. Уильямс - в центре изучения энергетики и окружающей среды Принстонского университета, Принстон, Нью Джерси 08544, США.

Начиная с появления предложения¹ об удерживании углерода лесами в качестве стратегии по компенсации выделения CO_2 с целью уменьшения потепления от парникового эффекта (парникового потепления), оно неоднократно обсуждалось²⁻¹⁷. Хотя иногда упоминалась замена ископаемого топлива на биомассу¹⁻⁹, не было проведено систематического сравнения этих альтернативных стратегий для преодоления парникового потепления.

В данной статье показано, что хотя удержание углерода лесами оказывается относительно дешевой стратегией по компенсации выделения CO_2 , вызываемого сгоранием ископаемого топлива, можно добиться значительно больших выгод путем замены ископаемого топлива на биомассу, которая выращивается непрерывно и трансформируется в полезную энергию при помощи современных преобразовательных технологий. Предназначенная для замены угля биомасса может обладать такой же эффективностью сокращения выделения CO_2 , что и процесс удержания углерода (в пересчете на тонну биомассы). Правда, замена топлива может продолжаться неограниченно долго, а удержание углерода лесами может быть эффективным только до тех пор, пока лес не достигнет зрелости. Кроме того, в любое заданное время для замены ископаемого топлива можно привлечь гораздо большие ресурсы биомассы, нежели к процессу удержания углерода. Причин две: во-первых, для

энергетических приложений производители будут стремиться искать образцы биомассы с более высоким годовым выходом; во-вторых, биомасса для энергетики может быть получена не только из молодых лесов, но и из других источников. Поэтому биомасса может играть более значительную роль в уменьшении парникового потепления путем замены ископаемого топлива по сравнению с процессом удержания углерода. Более того, во многих случаях энергия биомассы в принципе обходится дешевле, чем энергия от заменяемого ископаемого топлива, так что результирующие затраты на замену источников CO_2 часто окажутся отрицательными. Поэтому биоэнергетические стратегии содержат попутные побудительные экономические мотивы, что делает их по существу легче выполнимыми, чем многие другие стратегии преодоления парникового нагрева.

УДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА

Основное предложение по удержанию углерода призывает к постоянной посадке деревьев в лесных заповедниках. При таком подходе поглощение углерода будет продолжаться до тех пор, пока лес не созреет - этот период может составлять от 40 до 100 лет, если выбраны деревья с большим циклом оборачиваемости. Такое решение не является долгосрочным, но оно дает время на разработку альтернативных источников

энергии, не выделяющих CO_2 . Способность растущих лесов поглощать углерод из атмосферы зависит от разных факторов, но величина в 2,7 тонны углерода на гектар леса в год (тС/га/г) - это типичное среднее значение¹⁸, предполагаемое в большинстве исследований по удержанию углерода. Поскольку биомасса в пересчете на сухой продукт почти наполовину состоит из углерода, ее соответствующая продуктивность будет примерно вдвое выше. Однако Моултон и Ричардс подсчитали, что полное удержание углерода лесной экосистемой (включая углерод в корнях и почве) может в среднем составить 5,3 тС/га/г для американской программы разведения лесов, в которую входят до 139 миллионов гектаров экономически малорентабельных и чувствительных к изменению окружающей среды полей и пастбищ, а также неполноценных лесов, принадлежащих частным владельцам, а не лесной индустрии. Такая программа обладает потенциалом компенсировать до 56% современного выделения CO_2 в США¹².

Среди вариантов предложения по удержанию углерода, позволяющих осуществлять непрерывное поглощение углерода лесами после их созревания, упомянем рубку созревших деревьев и высадку молодых, причем срубленный лес помещается на постоянное хранение ("консервация деревьев") либо стимулируется рыночный интерес к долгоживущим лесным материалам путем предоставления премий за заготовку деревьев для этих целей¹⁸. Требования к заготовке деревьев, транспортировке и хранению сделают вариант "консервации" гораздо более дорогим по сравнению с нормальным переозеленением и поэтому гораздо менее интересным по крайней мере до тех пор, пока не столь дорогие варианты не истощатся. Похоже, что спрос на долгоживущие лесные материалы способен компенсировать лишь малую часть выделение CO_2 от ископаемого топлива. На период 1985 - 1987 г.г. общее потребление распиленного дерева и древесных панелей в среднем составило только 600 миллионов м³/год¹⁹, что соответствует полному содержанию углерода 0,13 гигатонн/год (Гт/год). Оцениваемый нормальный рост спроса лежит в интервале 2-3 % в год до 2000 года²⁰ и не похоже, чтобы предоставление льгот сильно увеличило спрос. Поэтому существующие и перспективные темпы удержания углерода в долгоживущих лесных материалах малы по сравнению с темпами выделения антропогенного CO_2 , составлявшими в 1985 г. что-то около 5,9 Гт/год. Удержание углерода в деревьях будет, по-видимому, рассматриваться главным образом в виде основного ва-

рианта удержания, а не на основе этих вариантов.

Стоимость компенсации излучения CO_2 путем удержания углерода в деревьях прямо связана со стоимостью выращиваемой биомассы. В соответствии с расчетами Моултона и Ричардса средние и предельные расходы на программу выращивания деревьев для компенсации 56 процентов CO_2 , выделяющегося в США при сжигании топлива, составят 27 долл/тС и 48 долл/тС (см. рис. 1), соответственно¹². Ежегодная стоимость такой крупномасштабной американской программы (около 19,5 миллиардов долларов) должна быть оплачена налогами на углерод со ставкой 15 долл/тС за потребление любого вида ископаемого топлива. По нашим оценкам, в результате увеличится на 0,4 цента/кВт час (добавка в 7%) плата за электроэнергию, выработанную на угольных станциях, и на 1,0 цент/литр цена бензина. Если бы темпы удержания составляли половину от рассчитанных Моултоном и Ричардсом, то требуемый налог вырос бы вдвое.

Эти расходы являются умеренными по сравнению с произведенными в настоящее время оценками затрат на регенерацию и удержание углерода на электростанциях с природным топливом. Как было подсчитано, следует потратить около 120 долл/тС в Голландии²¹, чтобы регенерировать 90 % CO_2 из выходных газов паровых электростанций, питаемых углем, и направить его по трубам для удержания углерода в заброшенные хранилища природного газа. При новом подходе, применимом для электростанций с газификацией угля, оценки затрат на отделение CO_2 и удержание углерода дают немногим более 50 долл/тС^{21,22}, что все еще превышает оценки затрат на удержание углерода новыми лесами¹².

Хотя расходы на компенсацию излучения CO_2 путем удержания углерода лесами малы, они все же обычно выше ожидаемых доходов, поскольку типично отсутствие значительной веры в компенсацию затрат при малых доходах. У некоторых альтернативных стратегий по уменьшению выделения CO_2 расходный баланс может оказаться отрицательным, потому что доходы могут превысить капитальные расходы, например, вложения в улучшение энергоэффективности, позволяющие избавиться от более дорогих затрат по энергоснабжению²³. Детальные исследования в Швеции²⁴ и Голландии²⁵ показали, например, что можно добиться значительных уменьшений выделений CO_2 в этих странах при отрицательном расходном балансе путем использования экономически выгодных возможностей повышения энергоэффективности. Пока

существуют возможности сокращения выделения CO_2 с отрицательным расходным балансом, им гарантирован более высокий приоритет по сравнению с выращиванием деревьев для удержания углерода.

ЗАМЕНА ИСКОПАЕМОГО ТОПЛИВА

Основная альтернатива удержанию углерода, т.е. стратегия использования биомассы для ограничения парникового потепления, заключается в непрерывном выращивании биомассы для энергетического рынка такими темпами, чтобы выращенное за данный период ее количество равнялось сожженному. Когда биомасса используется таким путем, нет результирующего роста содержания CO_2 в атмосфере, потому что выделяющийся при сгорании CO_2 компенсируется поглощающимся из атмосферы в результате фотосинтеза. Потенциал уменьшения выделения CO_2 благодаря замене топлива на биомассу зависит от вида заменяемого топлива и от относительной эффективности преобразования биомассы и ископаемого топлива в полезную энергию.

Предположим сначала, что эффективности преобразования одинаковы. Тогда каждый ГДж биомассы, заменившей ископаемое топливо, уменьшит выделение углерода на его долю в 1 ГДж замененного топлива: 0,014 тС, 0,019-0,020 тС и 0,023-0,025 тС для природного газа, нефти и угля, соответственно. Сухая биомасса с теплотворной способностью 20 ГДж/т и содержанием углерода 0.5 тС/т может эффективно удерживать $0,5/20 = 0,025$ тС на каждый ГДж выделяемого тепла. Таким образом замена угля на биомассу практически эквивалентна процессу удержания углерода лесами, а использование биомассы вместо нефти и природного газа будет не столь эффективно по сравнению с удержанием углерода, если говорить о влиянии на атмосферу производства одной тонны биомассы.

На практике эффективность производства полезной энергии не будет одинаковой для биомассы и ископаемого топлива. Уже привычно полагать, что эффективность биомассы значительно ниже. Большая часть биомассы, используемой сейчас в мире для производства энергии, представляет из себя опилки, отбросы зерна и навоз, которые преобразуются в рабочий продукт в городских районах развивающихся стран. Эффективность порядка 10 %, что примерно в пять раз ниже, чем для стандартных печей, нагреваемых природным газом или газовыми нефтепродуктами. Далее, по сравнению с эффективностью 34-36 %, достигаемой на современных крупных (400-600 МВт) паро-

вых электростанциях с угольным топливом, типичная паровая электростанция на биомассе обладает эффективностью в диапазоне 20-25 %. Жесткие экономические требования, присущие паровым электростанциям, диктуют необходимость использования более дешевых сплавов в конструкции бойлера, что ведет к образованию пара худшего качества и к более низкой эффективности на станциях с мощностью масштаба десятков МВт, которые как раз и требуются для использования биомассы, поскольку ее источники достаточно разбросаны. Более того, если производить из биомассы жидкое топливо, например, метанол или этанол, в качестве альтернативы бензину для транспортных нужд, потери при преобразовании достигают^{26,27} почти 50%, в то время как потери на очистку для производства бензина из нефти составляют всего лишь около 10%.

Однако эта перспектива изменится, если принять к рассмотрению современные технологии преобразования и будущие энергопотребности. Скорее всего, в ближайшее время для производства электроэнергии из биомассы в умеренных масштабах будет выбрана технология, совмещающая газификаторы и газовые турбины, которые обещают иметь более высокую эффективность по сравнению с угольными паровыми электростанциями, а также более низкие капитальные затраты²⁸⁻³⁰. Кроме того, если рассматривать синтезированное из биомассы жидкое топливо не как альтернативу жидкому топливу, полученному из нефти, а как альтернативу синтетическому топливу, полученному из угля³¹ (а это вполне разумный подход для мира, сталкивающегося с уменьшением надежного снабжения нефтью), то эффективности преобразования для биомассы и залежей ископаемого топлива сравнимы.

Таким образом, если биомассу рассматривать главным образом как заменитель угля с использованием современных технологий преобразования в качестве производителя либо электроэнергии, либо жидкого синтезированного топлива, влияние на содержащийся в атмосфере CO_2 в пересчете на тонну произведенной биомассы будет сравнимо с тем, чего можно добиться в процессе удержания углерода (см. рис. 1).

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПАРНИКОВОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Как было отмечено выше, биомасса может играть более значительную роль в ослаблении глобального потепления, если ее

использовать для замены ископаемого топлива, а не для удержания углерода. Отчасти это связано с тем, что при замене ископаемого топлива использование данного участка Земли не ограничено только периодом созревания леса, как в основном предложении по удержанию углерода. Кроме того, рынок биомассы как замены ископаемого топлива значительно больше, нежели в случае предложения по удержанию, где углерод хранится в долгоживущих лесных материалах.

Более того, когда биомасса производится на энергетический рынок, производители будут стремиться максимизировать ее годовой "урожай", а не полное количество углерода, которое может быть удержано созревшим лесом. Это смещение приоритетов повидимому приведет производителей к выбору быстрорастущих древесных или травяных культур вместо долгорастущих лесов. Достижимые урожаи для таких долгорастущих лесов при современной технологии составляют около 4 - 8 тонн сухой массы в год на гектар в районах с умеренным климатом и 10 - 12 т/га/г в тропических районах, что следует сравнивать с урожаями быстрорастущих древесных культур в 9 - 12 т/га/г для районов с умеренным климатом и 20 - 30 т/га/г для тропических районов^{9,32-35}. Более того, у травяных культур возможны еще более высокие урожаи. Например, годовой сбор сахарного тростника, усредненный по 17 миллионам гектаров, занятым этой культурой по всему миру в 1987 г., составлял около 35 сухих тонн/га/г, куда включены только надземные части растений (включая листья и верхушки). В ряде мест (например, Эфиопия, Гавайи, Перу, Зимбабве) средний урожай вдвое превышал усредненное всемирное значение³⁶. К тому же травяные культуры часто можно выращивать на полях и пастбищах, где почвенные и климатические условия оказываются не самыми благоприятными для выращивания деревьев. Например, было найдено, что вечнозеленое травянистое растение *Panicum virgatum* является достаточно засухоустойчивым и обеспечивает хороший контроль над эрозией почвы. В то же время оно дает хороший урожай на заброшенных полях США (свыше 10 т/га/г) с относительно низким уровнем начальных затрат^{37,38}.

Биомасса может также играть более значительную роль в преодолении парникового нагрева как заменитель ископаемого топлива, а не как склад удержанного углерода, поскольку земля, которая может быть использована для производства продукции, не ограничена новыми землями для разведения лесов или альтернативных культур. В

исследовании, проведенном для Окриджской национальной лаборатории, было подсчитано, что полный энергетический потенциал США от биомассы в период после 2000 г. составит 29,3 ЭДж/г (1 экзаджоуль равен 10^{18} Дж). Сравнимый вклад в него будут давать сельскохозяйственные и древесные отбросы, которые можно будет экономически выгодно регенерировать экологически приемлемыми способами (8,9 ЭДж/г), рост существующих лесов (9,5 ЭДж/г) и энергия биомассы (10,8 ЭДж/г)³⁹ (табл. 4).

Хотя отдельные остатки биомассы уже часто используются для энергетики или других целей, их можно использовать более эффективно на основе современных экономически выгодных технологий преобразования. Например, в промышленности сахарного тростника изрубленные и отжатые стебли сейчас полностью используются в большинстве стран, производящих сахар, только для удовлетворения нужд сахарных заводов в паре и электричестве. Но при применении фабричного оборудования, работающего на паре с достаточно высокой эффективностью, при использовании газовых турбин с газификаторами биомассы вместо малоэффективных паровых турбин для производства электроэнергии, а также при превращении в биомассу верхушек стеблей тростника и листьев (которые сейчас часто сжигаются перед сбором урожая) наряду с отжатыми стеблями вполне возможно увеличить производство электроэнергии от остатков тростника более, чем в 40 раз, для удовлетворения внешних потребностей без ущемления потребностей в паре для процесса производства сахара²⁹. Аналогичным образом, использование в высокоэффективных мельницах остатков древесной массы, служащей для получения картона, для генерации электроэнергии на основе газовых турбин может привести к более, чем пятикратному повышению производства электроэнергии для внешних потребностей³⁰.

Часто и существующие леса могут обеспечить производство дополнительной биомассы для получения энергии сверх того, что добывается при лесозаготовках. Во многих лесах умеренной зоны среднегодовые заготовки много меньше среднегодового прироста. Например, проведенное в 1980 году Управлением технологических оценок при конгрессе США исследование дало оценку эффективного среднегодового прироста в коммерческих лесах США порядка 400 - 800 миллионов тонн/год в 70-х годах, в то время как среднегодовые заготовки "промышленных лесных материалов" для производства досок, бревен, бруса, древесной массы и других материалов составляли все-

го лишь 180 миллионов тонн/год за это же время⁴⁰. Значительная часть незаготавливаемого сырья обычно обладает слишком низким качеством для использования на рынке традиционных лесных продуктов, но она хорошо приспособлена для энергетических приложений. Удаление малокачественного древесного сырья для энергетических целей может одновременно привести к повышению урожайности леса высокого качества^{40,41}. Возрастающее производство высококачественных сортов дерева в обновляемых лесах, где уход идет по описанной выше схеме, может помочь уменьшить стремление к использованию девственных лесов и тем самым ослабить экологические опасения.

Существующие леса также могут быть сделаны более продуктивными путем полного складирования деревьев, подходящих для строительных целей. По оценкам Управления технологических оценок, при полном складировании средний ежегодный прирост биомассы в коммерческих лесах США может быть удвоен до 800-1600 т/г в соответствии со средней продуктивностью 4-8 т/га/г⁴⁰.

Возможности использования существующих лесов США для биоэнергетических целей можно оценить, исходя из предполагаемого производства биомассы 6 т/га/г на площади лесных участков в 190 миллионов гектаров (сюда не включены 14 миллионов гектаров лесных участков США, которые охраняются законом от эксплуатации в целях охраны окружающей среды и по другим причинам, а также 86 миллионов гектаров других американских лесных массивов). Потенциальное производство биомассы на коммерческих лесных участках США сверх существующего уровня (около 200 миллионов т/г) составило бы 940 миллионов т/г, или 18,8 ЭДж/г, что эквивалентно в энергетических единицах ежегодному потреблению угля Соединенными Штатами. Похоже, конечно, что будет использован не весь потенциал. Проведенные в Окриджской национальной лаборатории исследования (1989 г.) по биоэнергетическому потенциалу США были нацелены на воспроизводство примерно половины указанной величины³⁹.

На глобальном уровне потенциал использования древесных продуктов от существующих лесов для энергии совершенно не известен из-за малого числа данных о полной продуктивности мировых лесов. Однако, как подсчитал Эрл, годовое поступление лесопроductов составило в 1970 г. $17,8 \cdot 10^9$ м³ с 3800 миллионов гектаров мировых лесов⁴². Укажем для сравнения, что оцениваемые глобальные среднегодовые сборы лесопроductов на период 1985-87 гг. составляют $3,26 \cdot 10^9$ м³ промышленного кругляка, дров

и древесного угля¹⁹. Если продуктивность мировых лесов сегодня близка к оценкам Эрла, часть неиспользованного поступления может быть регенерирована для энергетических целей (ее энергосодержание составляет 125 ЕДж/г, что в 1,27 раз превышает потребление угля во всем мире в 1988 г.⁴³).

На практике источниками биомассы для энергетических целей станут скорее всего различные смеси остатки лесопромышленности, избытки продукции от существующих лесов, а также деревья и кустарники, посаженные специально для энергетических целей на пустынных землях или на вырубленных лесных участках. Наиболее подходящая смесь будет определяться экономикой, доступными ресурсами воды и земли, а также ограничениями, вытекающими из соображений охраны окружающей среды и сохранения природных земель.

СТОИМОСТЬ УМЕНЬШЕНИЯ НАГРЕВА ОТ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

Производство биомассы для энергетических целей обходится гораздо дороже, нежели выращивание лесов для удержания углерода из-за дополнительных затрат на сбор, обработку, транспортировку, высушивание и хранение древесных материалов. Например, для быстрооборачиваемых древесных культур полная стоимость биомассы в установках по преобразованию энергии может быть в три раза выше стоимости выращивания биомассы (табл.5)^{44,45}. Но доход от продажи энергии, полученной от биомассы, можно считать кредитом на затраты по ее производству. При этом учитываются оценочные затраты на сокращение выделения CO₂ как для генерации энергии, так и для производства жидких топлив из биомассы с использованием альтернативных технологий в качестве альтернативы ископаемому топливу (рис. 1 и табл.2,3).

Произведенная в паровых электростанциях энергия окажется более дорогой при использовании биомассы, чем при использовании угля (при стоимости биомассы чуть выше одного доллара за ГДж, тогда как стоимость угля составляет около 1,8 доллара за ГДж - это типичная ожидаемая цена угольных станций (в расчете на среднее время жизни), которую сейчас могут предложить в США. Соответствующая стоимость CO₂ из ископаемого топлива, замещенного биомассой на основе этой технологии, будет выше стоимости удержания углерода в лесах за исключением особых обстоятельств, когда биомасса доступна по очень низкой цене (например, остатки от обработки в лесной промышленности).

Напротив, при использовании технологий газификации биомассы для питания газовых турбин, которые, как ожидается, потребуют меньше капитальных затрат по сравнению с паровыми электростанциями и будут обладать сравнимой или даже большей эффективностью, электроэнергия от биомассы может оказаться более дешевой, чем электроэнергия от угля, даже если цена биомассы будет вдвое превышать цену угля (см. табл.6). Поскольку, как кажется, существует много источников биомассы с ценами ниже удвоенной цены угля, соответствующие затраты на сокращение выделения CO_2 часто окажутся отрицательными, если заменить угольные паровые электростанции на электрогенераторы с газовыми турбинами, питаемыми от газификаторов биомассы (рис.1а и табл.2).

Хотя биомассовые варианты рассматриваемых здесь газотурбинных технологий могут быть поставлены на коммерческую ногу быстрее соответствующих угольных вариантов (поскольку для угля нужны еще не апробированные технологии удаления серы, а для биомассы они не требуются), все же последние могут в конечном итоге превратиться в источники прибыли. Если бы они стали нормой для производства электроэнергии с потреблением угля, то биомассовые варианты могли бы еще оставаться конкурентноспособными при цене биомассы, превышающей стоимость угля не более, чем на 20%, поскольку предприятия по производству биомассы потребуют меньше капитальных затрат (табл.6).

На рис.1а приведены результирующие затраты на уменьшение выделения CO_2 благодаря замене ископаемого топлива на биомассу в процессе производства жидких топлив на основе альтернативных технологий. Здесь полученные из биомассы метиловый и этиловый спирты рассматриваются в качестве замены бензину и полученному из угля метиловому спирту (табл.7). Что касается электроэнергии, то появляются большие возможности для замещения топлива, выделяющего CO_2 , биомассой при отрицательной стоимости. Указанные экономические соображения кажутся особенно обещающими для этилового спирта, получаемого из целлюлозного сырья (например, дерева) при использовании ферментного гидролиза²⁷.

Поскольку ни одна из описанных здесь технологий (газотурбинная и спиртовая) пока что еще не стала доступной на коммерческом уровне, нельзя придавать высокую точность этим оценкам затрат. Но все же такие оценки недалеки от истины, по крайней мере, для технологий производства электроэнергии на основе газовых турбин и

газификаторов биомассы, а также технологий производства метилового спирта из биомассы, поскольку для них не существует серьезных технологических препятствий, которые следовало бы преодолеть для постановки дела на широкую коммерческую основу.

ПОТЕНЦИАЛ ДЛЯ ЭНЕРГИИ ОТ БИОМАССЫ В ПРЕОДОЛЕНИИ ПАРНИКОВОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Сценарии глобального выделения CO_2 , проработанные рабочей группой III Межправительственного совещания по климатическим изменениям (IPCC)⁴⁶, создают полезный контекст для изучения глобальных перспектив устранения выделения CO_2 путем замены ископаемого топлива на биомассу. В табл.1 представлены уровни глобального выделения для трех сценариев IPCC до середины следующего века.

Для сценария "обычного бизнеса" (Сценарий А) рабочая группа I IPCC предсказывает, что нарастание парниковых газов приведет к возрастанию глобальной средней температуры со скоростью 0,3 C за десятилетие и к 2100 году оно достигнет 4 C по сравнению с прединдустриальным уровнем⁴⁷. В сценарии D - самом претенциозном сценарии, рассмотренным рабочей группой III для преодоления парникового потепления, выделение парниковых газов, эквивалентных по своему действию CO_2 , стабилизируется к 2100 году на уровне 560 ppm, что вдвое превышает прединдустриальный уровень CO_2 , а глобальная средняя температура будет увеличиваться на 0,1 C за десятилетие и превысит прединдустриальный уровень на 2 C к 2100 году⁴⁷. В этом сценарии уделяется большое внимание энергоэффективности, переходу к обновляемым источникам энергии, ядерной энергии в первой половине 21 века, а также изменению курса процесса обезлесивания на противоположный.

Мы изучим сейчас возможности снижения выделения CO_2 до уровней, предусмотренных в сценарии D, благодаря использованию биомассы для получения энергии. Создадим для этого примера новый, ориентированный на энергию от биомассы сценарий D' с тем же уровнем выделения CO_2 , что и в сценарии D (табл.1). Наш опорный сценарий является вариантом сценария В IPCC, где упор делается на энергоэффективность, природный газ как ископаемое топливо с малым содержанием углерода, обращение процесса обезлесивания и умеренные масштабы биоэнергетики. Мы выбрали его в качестве отправной точки из-за ряда соо-

бражений: похоже, что энергоэффективность оказывается наиболее экономичной стратегией уменьшения выделения парниковых газов^{24,25}; общепризнано, что придется выбирать в качестве ископаемого топлива на ближайшие десятилетия именно природный газ⁴⁸; достигнут консенсус в вопросе о том, что следует положить предел процессу обезлесивания, даже хотя достижение этой цели может оказаться затруднительным. Однако чтобы избежать двойного учета биомассы при оценке потенциальной роли биоэнергетики, мы создали для нашего опорного сценария вариант сценария В (сценарий В'), куда вообще не входит биомасса для энергии. В сценарии В' предполагается, что процесс обезлесивания приостановлен, но еще не повернут в противоположном направлении, а уголь заменяется на биомассу, используемую для получения энергии в сценарии В (табл.1). Если бы все различия в газовыделении между сценариями В' и D' были получены заменой угля на биомассу, то надо исключить выделения ископаемого CO₂, достигающие 1,7 ГтС/г к 2025 г. и 5,4 ГтС/г к 2050 г. (табл.1).

Уменьшение выделения парниковых газов, которое требуется достигнуть к 2025 г., вероятно можно будет осуществить при использовании для энергетических целей ряда остаточных продуктов, являющихся главными кандидатами для первых биоэнергетических систем. Как следует из детальной экспертизы, существуют благоприятные экономические перспективы в индустрии сахарного тростника, где параллельно производятся электроэнергия, а также сахар или спирт²⁹, и в картонной промышленности, где одновременно производятся электроэнергия и жидкая картонная масса³⁰. Есть много других побочных продуктов, которые также вероятно можно будет использовать (табл. 8,9).

Мы полагаем, что к 2050 г. одна треть намеченного уменьшения выделения ископаемого CO₂ будет достигнута путем замены угля на побочные промышленные продукты, а две трети - заменой угля на подходящие для получения биомассы культуры (как травянистые, так и древесные), растущие на 600 миллионах гектаров со средней производительностью сухого вещества 12 т/га/г.

Будучи гораздо выше производительности природных лесов, эти предполагаемые значения того же порядка, что было достигнуто к настоящему времени в экспериментах и демонстрировалось на наглядных примерах, а также было получено в рамках ограниченной коммерческой деятельности в полевых условиях (смотрите приведенные выше обсуждения). Считается, что эра со-

временного научного лесоводства началась только где-то в 70-х годах как в умеренных, так и в тропических зонах⁹, а выращивание травянистых культур для энергетических целей находится в еще более эмбрионной стадии. Но даже при этом вполне вероятно удастся достичь по крайней мере приведенной выше средней производительности на больших площадях ко второй четверти следующего века. Для сравнения укажем, что средняя урожайность пшеницы в Великобритании и кукурузы в США более чем утроились по сравнению с серединой 40-х годов. Сейчас средний урожай кукурузы в США составляет 7,5 т/га/г зерна плюс такое же количество вторичных продуктов (табл.8). Более того, намеченная среднегодовая продуктивность соответствует эффективности преобразования солнечной энергии в возвращаемую энергию биомассы всего лишь 0,4%, в то время как практическая максимальная эффективность фотосинтеза в полевых условиях составляет около 5%⁴⁹, а величина в 2,4% уже получена в оптимальных полевых условиях для травы Напье⁵⁰. Судя по этим данным, существует значительный потенциал долгосрочного прироста.

Посевная площадь, намеченная для биоэнергетических культур к 2050 году, эквивалентна 15% и 40% площади земли, отведенной сейчас на леса и посевы, соответственно¹⁹. Она эквивалентна также и площади засадки новых лесов к 2050 году, если удастся реализовать честолюбивые планы роста площади лесов со скоростью 12 миллионов га/г уже в начале следующего века, согласованные в Нордвайкской декларации (ноябрь 1989 г.).⁵¹

По оценкам Хафтона, 500 миллионов гектаров земли в Африке, Азии и Латинской Америке могли бы оказаться доступными для повторного лесонасаждения³. Вот его критерии доступности: (1) земля в прошлом была занята лесом; (2) земля в настоящее время не используется для посевов или поселений. Он оценил также, что дополнительные 365 миллионов гектаров земли, находящихся под парами, можно было бы использовать для лесонасаждения. Из независимых оценок Гранье следует, что около 758 миллионов гектаров низкокачественной земли можно использовать для лесопосадок⁵². Более того, для выращивания биоэнергетических культур, например, вечнозеленых трав, можно использовать часть тропических лугов (их площадь во всем мире составляет около 1500 миллионов га). В настоящее время, каждый год сжигается около 750 миллионов гектаров этих лугов⁵³ - части их могла быть придана иная форма хозяйствования, если бы прибыли шли мест-

ному населению. Хотя различные оценки доступной земли оказываются весьма неопределенными, в них предполагается, что значительные площади могут быть доступными для производства биоэнергетических культур в тропических областях.

Значительные площади земель могут быть выделены для биоэнергетических культур и в промышленных странах. В Европейском сообществе из сферы производства придется вывести более 15 миллионов гектаров посевной площади, если окажутся поставленными под контроль сельскохозяйственные излишки и расходы сообщества на субсидии сельскому хозяйству.

В США в 1988 г. пустовало 30 миллионов гектаров посевной площади по причине сокращения производства или консервации земли⁶. Но доступной для производства биомассы земли может быть значительно больше. Кроме того около 43 миллионов гектаров посевной площади подвержены эрозии, скорость распространения которой превышает максимальное значение, когда самоподдерживающееся производство уже не может существовать¹². Если перевести эти земли с ежегодного производства продуктовых культур на разные многолетние биоэнергетические культуры, то резко снизится эрозия. Для других 43 миллионов гектаров посевных площадей существуют проблемы "увлажненности" - плохой дренаж, высокий уровень подземных вод или затопление. При использовании для нужд обычного сельского хозяйства эти земли часто служат потенциальным источником загрязнения поверхностных и подземных вод¹² - такие проблемы можно легче решать при производстве в качестве альтернативы некоторых типов биоэнергетических культур. Более того, количество пустующих посевных земель может значительно вырасти. В докладе специальной группы по новым сельхозпродуктам и лесным продуктам (1987 г.) дается оценка того, что через первые 25 лет следующего века для примерно 60 миллионов гектаров существующих посевных площадей потребуются новые культуры. Кроме того предполагается освоить для производства энергобиомассы еще 60 миллионов га, занятых сейчас под пастбища, полигоны и леса²⁷.

Требуемое поступление биомассы от "энергетических" культур можно было бы сократить либо за счет большего использования соответствующих побочных продуктов, либо за счет извлечения дополнительной биомассы из существующих лесов на основе улучшенного хозяйствования. Если достигнуть в середине следующего века сокращения общего выделения парниковых

газов до уровня, предусмотренного сценарием D', с равным вкладом от побочных продуктов, биоэнергетических культур и существующих лесов (как в оценках Окриджской лаборатории потенциального производства биомассы в США³⁹), то леса будут производить для получения энергии около половины своего ежегодного прироста⁴² (вместо существующего сокращения¹⁹) и поэтому требуемый вклад от биоэнергетических культур будет составлять всего половину. Но из-за неопределенностей в мировой лесной статистике мы не включили в сценарий D' вклада от продуктов современных лесов.

Мы приходим к выводу, что уровни выделения CO₂ в сценарии D можно вероятно достигнуть без использования иных источников энергии с малым содержанием углерода помимо природного газа и биомассы. Может оказаться возможным еще более уменьшить выделение путем эксплуатации других обновляемых энергетических технологий, для которых перспективы кажутся благоприятными, как было безоговорочно признано рабочей группой III при составлении сценария D.

К УСТОЙЧИВОМУ ПРОИЗВОДСТВУ БИОМАССЫ

Если биомассе придется играть основную роль в экономии энергии, требуются стратегии для получения больших урожаев на крупных площадях в течение длительных периодов. Более чем столетний опыт поддержания высоких урожаев сахарного тростника в странах бассейна Карибского моря и в Бразилии дает основание верить, что это возможно, но для достижения более обширных целей потребуются хорошее управление и новые исследования.

Достижение устойчивой производительности и поддержание биологического разнообразия могут потребовать многокультурных стратегий (например, смеси индивидуальных видов в различных переменных конфигурациях посевов) для производства биомассы во многих областях. Системы биомассы для энергетических целей обычно могут снабжаться от разнообразных источников сырья. Однако в настоящее время для технических энергокультур в почете монокультуры в основном благодаря существующей тенденции использовать методику хозяйствования, приспособленную от монокультурных систем в сельском хозяйстве. Методикам многокультурного хозяйствования гарантируется высокий приоритет в НИОКРах с энергетическими культурами.

В то время как результирующий энерговыход биомассы для быстрорастущих

древесных культур обычно в 12 раз превышает энергозатраты⁵⁶, желательнее как с экологической, так и с экономической точки зрения попытаться сократить энергозатраты. Например, можно установить режим удобрений для молодых лесных посадок, регулярно меняя удобрения и подбирая соответствующие комбинации видов.^{57,58} На перспективность таких стратегий указывают десятилетние испытания на Гавайях, где был достигнут урожай 25 т/га/г (в сухой массе) без азотных удобрений, но при чередующейся посадке эвкалиптов и деревьев *Albizia*, которые удерживают почвенный азот.⁵⁹

Исследования могут привести не только к улучшению существующих технологий по производству энергокультур, но и к новым подходам. Например, длительные эксперименты в Швеции показали следующее: (1) в большинстве лесов скорость роста деревьев значительно ниже их природного потенциала; (2) наличие удобрений обычно служит наиболее существенным ограничивающим фактором; (3) оптимизация режима удобрений может привести к четырехкратному и даже шестикратному увеличению производительности. В оптимизированных по удобрениям условиях все изученные древесные виды вели себя как зерновые культуры типа C_3 примерно с тем же полным выходом биомассы в расчете на единицу светового потока, перехваченного листьями за сезон роста.^{60,61}

Таким образом, выращивание деревьев в оптимизированных по удобрениям условиях поможет сделать возможной высокую производительность и способствовать тем самым установлению сопротивляемости к паразитам и другим полезным характеристикам, а также установлению разнообразной мозаики ландшафта. В той степени, в какой посевные площади и пустыри будут преобразованы такими способами в плантации культур для энергетических целей, может оказаться выполнимым не только поддержание, но и улучшение биологического разнообразия. Дополнительное преимущество от занятия стратегиями производства без ограничения удобрений заключается в том, что у деревьев наблюдается непропорционально высокий процентный сдвиг в увеличении общей производительности от корней к наземным частям - и этому опять находится аналогия у сельскохозяйственных культур³⁵.

Тот уровень увеличения производительности, который вызывается удобрениями может быть достигнут без перенасыщения удобрениями, а когда практикуется хорошее лесное хозяйство. Но получение

устойчивых высоких урожаев таким способом требует внедрения методик, развитых для приспособления техники удобрения к зависящим от времени потребностям в удобрениях^{60,62}.

Достижение высокого уровня биологического разнообразия также потребует того, чтобы часть земель в районах, производящих биомассу, находилась в "естественных" условиях. Например, некоторым видам птиц нужны для выживания мертвый лес и соответствующие популяции насекомых. Эксперименты в шведских лесах наводят на мысль, что содержание относительно умеренной части лесной площади в виде природного резерва равносильно поддержанию высокого уровня разнообразия птичьих пород.⁶³ Нужны исследования для понимания того, как лучше всего добиться желаемого уровня биологического разнообразия в широком диапазоне условий, когда можно высвободить биомассу для получения энергии.

Хотя основное расширение исследовательских усилий связано с устойчивым производством биомассы, сейчас как раз наступило время для необходимых исследований и обширных экспериментов, поскольку в ближайшие десятилетия может быть развернута крупная биоэнергетическая промышленность, использующая в виде сырья главным образом побочные продукты сельскохозяйственной и лесоперерабатывающей промышленности.

НЕОБХОДИМЫЕ РАЗРАБОТКИ В ТЕХНОЛОГИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ БИОМАССЫ

Если биомассе суждена основная роль в экономии глобальной энергии, то требуются НИОКРы по эффективному и практичному преобразованию биомассы в современные энергоносители.

В то время как относительно мало НИОКРов было посвящено преобразованию энергии биомассы, значительные усилия направлялись на "модернизацию угля" путем термохимического преобразования для получения как электроэнергии, так и жидкого топлива. Часть таких конверсионных технологий может быть приспособлена и для биомассы.

В ближайшем будущем благоприятны перспективы для постановки на коммерческую ногу технологий производства энергии на основе газификаторов биомассы в сочетании с газовыми турбинами, которые первоначально конструировались в расчете на уголь. В то время как приобретенные коммерческий вид технологии с газификаторами угля и газовыми турбинами не могут прои-

зводить электричество дешевле существующих паровых электростанций на угле, находящиеся в стадии разработки упрощенные варианты выдвигают возможности значительно меньшей стоимости.^{64,65} Подобным упрощенным технологиям можно будет вероятно более быстро придать коммерческий вид для биомассы, чем для угля, поскольку содержанием серы в биомассе можно пренебречь, а экономически эффективное удаление серы оказывается важным технологическим препятствием, которое должно быть преодолено, прежде чем подобные технологии с использованием угля могли бы стать коммерчески интересными²⁸⁻³⁰. Недавно финско-шведский консорциум объявил о планах создания демонстрационной установки с газификатором биомассы и газовой турбиной и пуске ее в действие в течение 2-3 лет⁶⁶.

В более далеком будущем НИОКРы по производству энергии следовало бы сконцентрировать на технологиях, хорошо приспособленных к характеристикам биомассы. Газификаторы надо конструировать с учетом того, что по сравнению с углем биомасса гораздо более реактивна и поэтому легче газифицируется. Следует разрабатывать также новые технологии производства энергии, отличные от газовых турбин, например усовершенствованные топливные элементы для применения с энергомасштабами менее 5-100 МВт (для этих масштабов хорошо подходят газовые турбины).

Из биомассы можно извлекать метиловый спирт путем технологии термохимического преобразования, похожей на ту, что применяется для угля. Хотя похоже, что при мелкомасштабном производстве метиловый спирт из биомассы дешевле спирта из угля⁶⁷, последний можно получать на гораздо более крупных предприятиях, что в результате приводит к экономии, а этого практически нельзя добиться с биомассой из-за размытого характера источников биомассы. Этот недостаток можно было бы также компенсировать, если развивать альтернативные технологии жидких топлив, использующие уникальные характеристики биомассы (например, основанные на биологических процессах технологии).

Этиловый спирт в больших масштабах производится в Бразилии из сахарного тростника путем ферментации. Хотя при существующей технологии цена этого спирта не конкурирует с мировыми ценами на нефть (на уровне августа 1990 г.), побочное производство электроэнергии из остатков тростника на основе технологии газификатор/турбина с перегонкой спирта может сделать этиловый спирт конкурентноспо-

собным даже при таких низких ценах на нефть²⁹. В странах с умеренным климатом кажется обещающим производство этилового спирта из сырья целлюлозной промышленности (например, древесины) на основе методики ферментного гидролиза. Проведенные в американском институте солнечной энергии анализы наводят на мысль, что при соответствующем внимании НИОКРам получаемый таким путем этиловый спирт мог бы конкурировать с бензином, полученным из нефти, к концу века при стоимости биомассы ниже 3 долл/ГДж (табл.7 и рис.1)²⁷.

Наконец, НИОКРы по выращиванию, сбору и приготовлению биомассового сырья следовало бы координировать с НИОКРами по преобразованию биомассы⁶⁸. Часто оказывается возможным значительно снизить стоимость дорогих этапов (например, сушки биомассы) или полную стоимость, применяя системный подход.

ВОПРОСЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Полная эксплуатация потенциальной энергии биомассы по-видимому потребует совсем иной промышленности по сравнению с той, которая сейчас обеспечивает энергию, поскольку биомассовые энергосистемы будут отличаться от существующих энергосистем - они будут размещаться в сельской местности, потребуют больших затрат труда, будут меняться от места к месту и станут более децентрализованными. По своей структуре эта промышленность будет обладать характеристиками современной сельскохозяйственной и лесоперерабатывающей промышленности, а также современной энергетической промышленности. Потребуется перемены в общественной политике, чтобы облегчить правильное развитие этой новой индустрии.

В то время как разговоры о необходимой политике выходят за рамки данного анализа, такие перемены могли бы вероятно быть осуществлены путем творческого использования обычных политических средств. Например, для поддержки энергопромышленности, основанной на использовании биомассы, могли бы стать полезными общественные меры по поощрению побочного производства электричества источниками обновляемой энергии типа Акта 1978 года о мерах по регулированию деятельности коммунальных сооружений. Во многом благодаря этому акту производство электроэнергии в США на основе биомассы выросло с примерно 250 МВт в 1980 г.⁶⁹ до 9000 МВт в 1990 г.²⁷ Более того, для поддержки биоэ-

нергетических промышленных разработок могут оказаться вполне достаточными меры, направленные на отмену сельскохозяйственных субсидий и одновременно обеспечивающие временную заинтересованность фермеров в переходе на производство биомассы для энергетических целей³⁴.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стратегии использования биомассы привлекают значительное внимание как варианты обуздания парникового потепления. Хотя до настоящего времени упор делался на выращивание деревьев для удержания углерода, биомасса сможет играть гораздо более важную роль благодаря современным системам преобразования энергии, обеспечившим рост использования биомассы для энергетических целей. Обычно стратегии использования биомассы более предпочтительны несмотря на то, что стратегии удержания углерода окажутся важными в тех случаях, когда произведенная биомасса не сможет практически быть использованной для энергетических целей (например, в районах, удаленных от рынков энергии, или на заболоченных участках) или когда создание новых лесов кажется привлекательным по экологическим или экономическим причинам. Более того, поскольку энергия от биомассы часто окажется дешевле энергии, полученной от ископаемого топлива, биоэнергетическим стратегиям будет присуща способность к гораздо более легкой реализации по сравнению со многими другими предложенными стратегиями преодоления парникового потепления.

Для реализации полного потенциала биоэнергетики следует более полно разработать методики и технологии выращивания биомассы и преобразования ее в современные энергоносители, а также развить новые промышленные инфраструктуры. Несмотря на такие условия, можно пустить в ход биоэнергетическую промышленность в ближайшие десятилетия, начиная с использования отходов сельскохозяйственной и лесоперерабатывающей промышленности. Сначала биомассу можно преобразовывать в современные энергоносители с использованием технологий, которые разработаны для угля и могут с небольшими дополнениями оказаться применимыми для биомассы. Если в то же самое время дать высокий приоритет НИОКРам, необходимым для устойчивого производства и преобразования биомассы, и если внутренняя политика будет поддерживать развитие биоэнергетической промышленности, то эта промышленность сможет совершенствоваться и приобретать но-

вые формы по мере роста и созревания.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА РИСУНКАХ И ТАБЛИЦАХ

Расчеты, результаты которых представлены на рисунках и таблицах, проводились самосогласованным способом. Все цены выражены в долларах 1989 года. Если вначале цены были выражены в ценах другого времени, то они преобразовывались в цены 1989 года при помощи фактора валового национального продукта США. Энергия топлива представлялась в терминах максимальной нагревательной способности.

При производстве электроэнергии цены рассчитывались с учетом процентной ставки в 6,1% (эта величина рекомендуется исследовательским институтом электроэнергии EPRI для расчета инвестиций), процента страховки в 0,5% и времени жизни системы в 30 лет. Результирующая процентная ставка равна 0,0784. Доход корпораций и налог на собственность не учитывались.

План-график расходов на капитальное строительство энергетических установок либо предполагался равным типичным значениям, либо, если опыта строительства подобных установок не имелось, то ежегодные считались одинаковыми (в соответствии с рекомендациями EPRI).

В последнем случае процентные ставки во время строительства рассчитывались по формуле:

$$IDC = [(1 + i)^g / g] / CRF(i, g) - 1,$$

где i - банковская ставка, g - среднее время строительства в годах, и

$$CRF(i, g) = i / [1 - (1 + i)^{-g}]$$

Стоимость производства топлива из биомассы рассчитывалась, исходя из реальной банковской ставки в 5 процентов, а при производстве жидкого синтетического горючего банковская ставка принималась равной 10 процентам.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа была поддержана Агентством по охране окружающей среды США, Фондом Уильяма и Флоры Хьюлетт, Фондом Джона Мерка, Фондом новых земель и Международным институтом по развитию сельского хозяйства имени Уинрока.

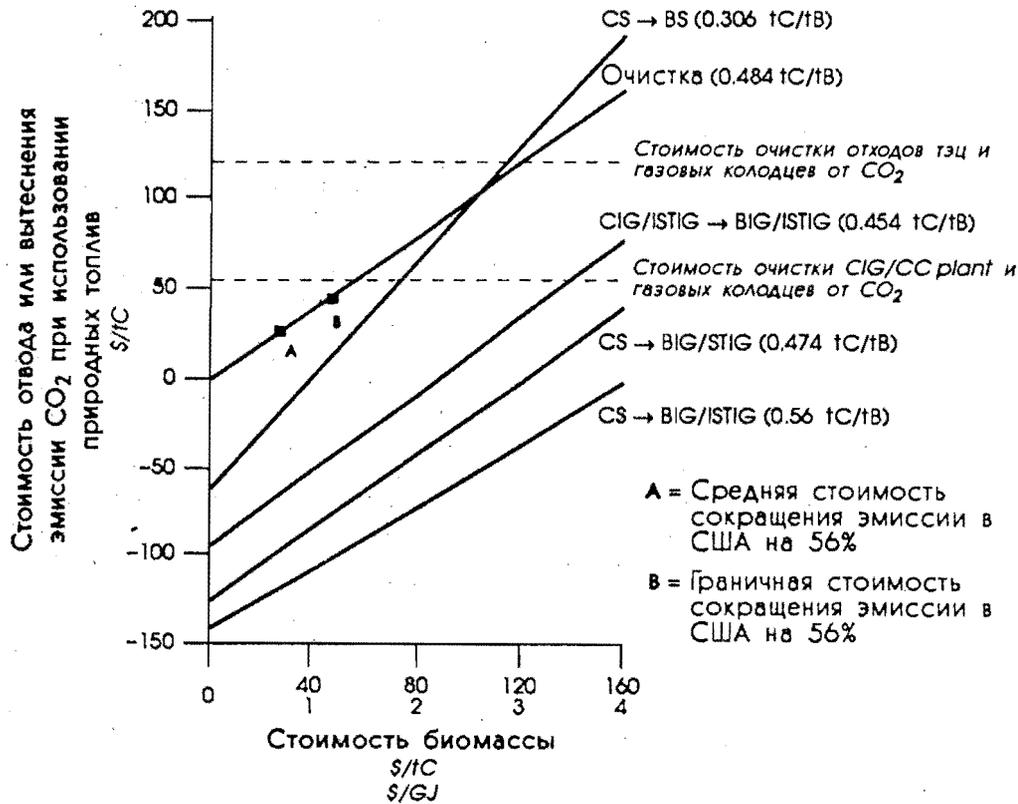


Рисунок 1а

Альтернативные способы использования биомассы для предотвращения парникового потепления (замена угля в производстве электроэнергии).

На рисунке показана зависимость стоимости исключения эмиссии CO₂ при использовании ископаемого топлива от стоимости биомассы (см. также результаты оценок стоимости в табл. 2 и 6). Точкой А отмечена средняя стоимость сокращения эмиссии в США на 56 процентов (27 долларов на тонну), а точкой В - граничная стоимость (48 долларов за тонну) при свободных посадках на 139 миллионах гектаров при средней скорости очистки от углерода в 5,3 тС/га в год. Стоимость суммарной эмиссии CO₂ при замене энергии ископаемого топлива на энергию биомассы равна $(C_b - C_f)/E_f$, где C_b и C_f - стоимости единицы энергетического выхода в системе биомассы и в системе ископаемого топлива, а E_f - скорость эмиссии CO₂ в тоннах углерода на единицу энергетического выхода (23 кг С на гигаджоуль). Отдельные линии соответствуют следующим способам:

- | | |
|-----------------------|---|
| CS - BS | Замена угля на биомассу на паровых электростанциях |
| CS - BIG/STIG | Замена угля на паровых электростанциях на биомассу в газогенераторах газотурбинных электростанций |
| CS - BIG/ISTIG | Замена угля на паровых электростанциях на биомассу в газотурбинных электростанциях с внутренним охлаждением |
| CIG/ISTIG - BIG/ISTIG | Замена угля на биомассу в газотурбинных электростанциях с внутренним охлаждением |

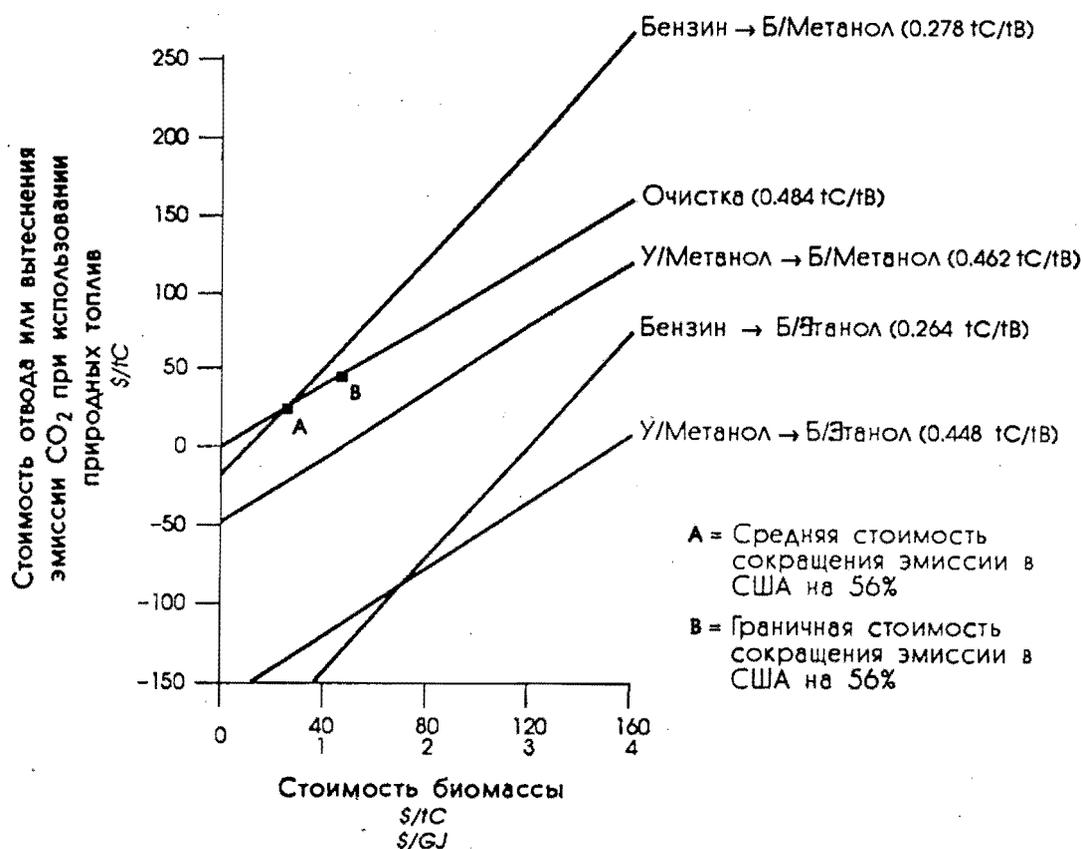


Рисунок 16

Альтернативные способы использования биомассы для предотвращения парникового потепления (использование биомассы в производстве жидкого топлива).

На рисунке показана зависимость стоимости исключения эмиссии CO_2 при использовании ископаемого топлива от стоимости биомассы (см. также результаты оценок стоимости в табл. 3 и 7). Точкой А отмечена средняя стоимость сокращения эмиссии в США на 56 процентов (27 долларов на тонну), а точкой В - граничная стоимость (48 долларов за тонну) при свободных посадках на 139 миллионах гектаров при средней скорости очистки от углерода в 5,3 тС/га в год. Стоимость суммарной эмиссии CO_2 при замене энергии ископаемого топлива на энергию биомассы равна $(C_b - C_f)/E_f$, где C_b и C_f - стоимости единицы энергетического выхода в системе биомассы и в системе ископаемого топлива, а E_f - скорость эмиссии CO_2 в тоннах углерода на единицу энергетического выхода (23 кг С на гигаджоуль). Отдельные линии соответствуют следующим способам:

- | | |
|-----------------------|--|
| Бензин → Б/Метанол | Замена бензина (25 центов за литр - оптовая цена 2000 года) на метанол из биомассы |
| У/Метанол → Б/Метанол | Замена метанола из угля на метанол из биомассы |
| Бензин → Б/Этанол | Замена бензина на этанол из биомассы |
| У/Метанол → Б/Этанол | Замена метанола из угля на этанол из биомассы |

Таблица 1

Альтернативные сценарии глобальной эмиссии CO₂ (в млрд. тонн С в год)¹⁻⁶

Год	A	B	B1	D	D1
Производство электроэнергии					
1985	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1
2000	6,5	5,6	5,6	5,7	5,4
2025	9,9	6,6	6,6	5,4	4,9
2050	13,5	7,6	8,1	3,0	2,7
Уничтожение лесов ⁷					
1985	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
2000	1,0	-0,2	0,0	-0,2	0,0
2025	1,4	-0,5	0,0	-0,5	0,0
2050	1,4	-0,3	0,0	-0,3	0,0
Производство цемента					
1985	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
2000	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2025	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2050	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Общая эмиссия					
1985	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
2000	7,7	5,5	5,8	5,6	5,6
2025	11,5	6,4	6,8	5,1	5,1
2050	15,2	7,5	8,3	2,9	2,9
<p>¹ Сценарии A, B и D, разработанные рабочей группой III межгосударственной комиссии по климатическим изменениям (см. табл. 8 приложения к документу Intergovernmental Panel on Climate Change, "Formulation of Response Strategies", report prepared for IPCC by Working Group III, June 1990) соответствуют усредненным вариантам высокого и среднего уровня экономического роста сценариев, разработанных рабочей группой III. Из-за округления суммы компонентов не всегда совпадают с итоговыми значениями.</p> <p>² Сценарий A соответствует неизменной ситуации: производство энергии остается основанным на угле, эффективность использования энергии значительно не увеличивается, тропические леса уничтожаются.</p> <p>³ В сценарии B происходит переход от угля к натуральному газу, эффективность использования энергии растет, а уничтожение лесов останавливается.</p> <p>⁴ В сценарии D дополнительно учитывается восстановление лесов и увеличение применения атомной энергии.</p> <p>⁵ В сценарии B1, разработанном авторами, произведена замена угля с энергетическим содержанием в 23,3 ЭДж/год на биомассу (см. текст).</p> <p>⁶ В сценарии D1, разработанном авторами, произведена замена ископаемых топлив на биомассу (см. текст).</p> <p>⁷ Следует учесть, что оценка вклада уничтожения лесов у рабочей группы III заметно меньше, чем у некоторых других авторов (в докладе рабочей группы I эта величина примерно вдвое больше).</p>					

Таблица 2

Параметры процесса замены угля на биомассу в производстве электроэнергии
(см. также табл.6).

Стоимость альтернативных методов производства электроэнергии			
Метод производства	Затраты энергии, Мдж/кВтч	Стоимость, центов/кВтч	
Вариант с углем			
CS = паровая электростанция, 2x500 МВт (см. табл. 6)	10,55	5,09	
CIG/ISTIG = газотурбинная установка, 109 МВт	8,55	3,50	
Вариант с биомассой			
BS = паровая электростанция, 27,6 МВт	15,36	3,60 + 1,536·P _b	
BIG/STIG = газотурбинная установка, 2x51,5 МВт	9,92	2,06 + 0,992·P _b	
BIG/ISTIG = газотурбинная установка с внутренним охлаждением, 111 МВт	8,39	1,65 + 0,839·P _b	
Результаты замены угля на биомассу			
Варианты замены	Заменяемая энергия угля, ГДж	Заменяемая эмиссия CO ₂ , тС/тБ	Общая стоимость замены CO ₂ , долларов/тС
CS → BS	13,31	0,306	-61,44 + 63,33·P _b
CS → BIG/STIG	20,61	0,474	-124,88 + 40,89·P _b
CS → BIG/ISTIG	24,37	0,560	-141,89 + 34,61·P _b
CIG/ISTIG → BIG/ISTIG	19,75	0,454	-94,13 + 42,69·P _b
<p>¹ Под биомассой понималась древесина тополя с теплотворной способностью 19,38 ГДж на тонну сухой массы с содержанием углерода в 25 килограммов на 1 ГДж; P_b - стоимость биомассы в долларах на 1 ГДж.</p> <p>² Теплотворная способность угля принималась равной 29,6 ГДж на тонну сухой массы, содержание углерода в угле равнялось 23 килограмма на 1 ГДж, стоимость угля принималась равной 1,83 доллара на 1 ГДж.</p> <p>³ Графическая иллюстрация этой таблицы приведена на рис. 16.</p>			

Таблица 3

Параметры процесса замены ископаемого жидкого топлива
на метанол или этанол из биомассы
(см. также табл. 7).

Стоимость альтернативных методов производства жидкого топлива			
Метод производства	Эффективность, в процентах	Стоимость, центов/литр	
Вариант с ископаемым топливом			
Б = бензин из нефти в ценах 2000 года	90,0	25,2	
У/Метанол = метанол из угля (установка фирмы Тексако)	55,7	29,9	
Вариант с биомассой			
Б/Метанол = метанол из биомассы, газификатор с водяным охлаждением	15,36	3,60 + 1,536·P _b	
Б/Этанол = этанол из биомассы, ферментный гидролиз	9,92	2,06 + 0,992·P _b	
Результаты замены ископаемого топлива на биомассу			
Варианты замены	Заменяемая энергия, ГДж	Заменяемая эмиссия CO ₂ , тС/тБ	Общая стоимость замены CO ₂ , долларов/тС
Б - Б/Метанол	14,0	0,278	-17,7 + 69,8·P _b
У/Метанол - Б/Метанол	20,1	0,462	-47,7 + 42,0·P _b
Б - Б/Этанол	13,2	0,264	-214,1 + 72,1·P _b
У/Метанол - Б/Метанол	19,5	0,448	-161,8 + 42,5·P _b
<p>¹ Под биомассой понималась древесина тополя с теплотворной способностью 19,38 ГДж на тонну сухой массы с содержанием углерода в 25 килограммов на 1 ГДж; P_b - стоимость биомассы в долларах на 1 ГДж.</p> <p>² Предполагалось, что 1 ГДж алкоголя эквивалентен 1,2 ГДж бензина, так что 1 л метанола (этанола) эквивалентен 0,59 (0,80) литра бензина.</p> <p>³ Графическая иллюстрация этой таблицы приведена на рис. 16.</p> <p>⁴ По оценке Министерства энергетики США стоимость одного литра бензина в 2000 году составит 25,2 цента за литр (Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook 1990 with Projections to 2010", DOE/EIA-0383(90)).</p> <p>⁵ При расчете стоимости метанола из угля стоимость угля принималась равной 1,58 доллара за 1 ГДж.</p>			

Таблица 4

Потенциальные ресурсы биомассы для энергетических целей в США,
по оценке Окриджской национальной лаборатории¹

Источник биомассы	Объем ресурсов, ² ЭДж/год	Стоимость, долл./ГДж	
		Текущая	Ожидаемая
<i>Отходы</i>			
Лесоразработки	0,8	>3	<2
Уход за парками и лесами	1,2	2	2
Деревообработка	2,1	1	<1
Земледелие	2,0	1-2	1
Городской мусор	2,4	2-3	<1,5
Животноводство	0,5	<4	3,5
<i>Итого</i>	<i>8,9</i>		
<i>Леса</i>			
Коммерческое лесное хозяйство	4,5	<2	<2
Улучшение содержания лесов	4,5		<2
Перевод 25% лесодобычи на производство энергии	0,5	2	2
<i>Итого</i>	<i>9,5</i>		
<i>Технические культуры</i>			
Масличные культуры	0,3		
Древесные культуры	3,2	3	2
Травы			
Лигноцеллюлоза	5,5	4	2
Новые масличные культуры	0,4		
Водоросли			
Микроводоросли	0,3		
Макроводоросли	1,1	3,5	2
<i>Итого</i>	<i>10,8</i>		
Всего	29,8		

¹ W. Fulkerson et al., "Energy Technology R&D: What Could Make a Difference? A Study by the Staff of the Oak Ridge National Laboratory, vol. 2, Supply Technology", ORNL-6541/V2/P2, December 1989, table 2.4-3, p.85.

² Эти данные относятся к суммарным потерям производства, до преобразования в твердое топливо или в электроэнергию.

Таблица 5

Стоимость доставки деревянных брусков с плантаций *populus*
(в долларах за тонну сухой массы)

Стоимость производства ¹⁻³	
Устройство плантации ⁴	5,27
Земельная рента ⁵	6,43
Постоянные расходы ⁶	
Инсектициды и фунгициды	0,93
Удобрения	1,07
Управление	2,64
Земельный налог	0,96
<i>Итого</i>	<i>17,30</i>
Сбор урожая ^{7,8}	
Уборка	4,58
Упаковка	3,87
<i>Итого</i>	<i>8,45</i>
Перевозка ⁹	
Погрузка и разгрузка	4,46
Оплата транспорта ¹⁰	5,15
<i>Итого</i>	<i>9,61</i>
Разделка ¹¹	3,15
Хранение и сушка ¹¹	
Хранение ¹²	6,77
Сушка ¹³	11,08
<i>Итого</i>	<i>17,85</i>
Всего	56,36
<p>¹ При выращивании на землях хорошего качества (см. С.Н. Strauss, L.L. Wright, "Woody Biomass Production Costs in the United States: An Economic Summary of Commercial <i>Populus</i> Plantation System", Solar Energy, v. 45, No. 2, 1990, p.p. 105 - 110). ² При расчетах принимались следующие значения параметров: время жизни плантации 12 лет, фактор окупаемости капитальных вложений 11,28%, стоимость земли 1800 долл./га, стоимость создания плантации 654 долл./га, стоимость работ по уходу за плантацией 78,5 долл./га в год, средний выход сухой древесины 950 ц/га. ³ При расчетах предполагалась эффективная урожайность в 140 ц/га в год. ⁴ В этот раздел входят затраты на выравнивание площадки, вспашку, гербициды и удобрения (при посадке), посадку саженцев. ⁵ Рента рассчитывалась из стоимости земли в 1800 долл./га. ⁶ Стоимость: инсектициды и фунгициды 13 долл./га, удобрения 15 долл./га, управление 37 долл./га и земельный налог 13,5 долл./га. ⁷ С.Н. Strauss et al., Solar Energy, v. 41, No. 2, 1988, p.p. 207 - 214. ⁸ Эти расходы включали предварительную сушку на плантации. ⁹ Дальность транспортировки считалась равной 40 км. ¹⁰ Хранение в течение 6 месяцев под толстой полиэтиленовой пленкой. ¹¹ Сушка вентилятором без подогрева. ¹² Теплотворная способность сухой древесины тополя 19,38 ГДж/тонну.</p>	

Таблица 6
Стоимость альтернативных методов производства электроэнергии¹
(центы 1989 года за киловатт-час)

Вид расходов	CS ⁴	BS ⁵	CIG/ STIG ⁶	BIG/ STIG ⁷	CIG/ ISTIG ⁶	BIG/ ISTIG ⁷
Топливо	1,055·P _c	1,536·P _c	1,011·P _c	0,992·P _c	0,855·P _c	0,839·P _c
Переменные	0,72	0,50	-0,16	0,10	-0,13	0,09
Постоянные	0,32	0,80	0,86	0,62	0,73	0,52
Капитальные	2,12	2,30	1,68	1,34	1,34	1,04
Всего	3,16 + 1,055·P _c	3,60 + 1,536·P _c	2,38 + 1,011·P _c	2,06 + 0,992·P _c	1,94 + 0,855·P _c	1,65 + 0,839·P _c
Примеры: P _c = \$1,8/ГДж ² P _b = \$1,8/ГДж ³	5,1	8,1	4,2	4,9	3,5	4,1

¹ P_c - стоимость угля, P_b - стоимость биомассы, в долларах на 1 ГДж. Переменные и постоянные расходы представляют стоимость обслуживания и эксплуатации.
² Средняя стоимость угля на севере центральной части США в 2000 - 2030 г.г., по оценке Министерства энергетики США.
³ Стоимость щепы быстрорастущего растения *populus*, см. табл. 5.
⁴ CS - субкритическая паровая электростанция на угле с двумя блоками по 500 МВт с энергозатратами 10,55 МДж/кВт с капитальными затратами 1610 долл./кВт. Продолжительность строительства принималась равной 8 годам, а загрузка по мощности 2 - 68 процентам. Процентные ставки на протяжении 8 лет увеличивают исходную стоимость строительства на 31 процент.
⁵ BS - паровая электростанция на биомассе с мощностью 27,6 МВт, энергозатратами 15,36 МДж/кВт, с капитальными затратами 1925 долл./кВт. Загрузка по мощности считалась равной 75 процентам.
⁶ CIG/STIG - газификатор угля, совмещенный с газотурбинной электростанцией с инъекцией пара, в установке CIG/ISTIG добавлено внутреннее охлаждение. Первая электростанция состоит из 2 блоков по 50,5 МВт, энергозатраты равны 10,11 МДж/кВтч, капитальная стоимость 1410 долл./кВт. Во втором варианте мощность блока 109,1 МВт, энергозатраты 8,55 МДж/кВтч, капитальная стоимость 1120 долл./кВт. Загрузка 75 процентов (см. табл. А-1 и А-2).
⁷ BIG/STIG - газификатор биомассы, совмещенный с газотурбинной электростанцией с инъекцией пара, в установке BIG/ISTIG добавлено внутреннее охлаждение. Первая электростанция состоит из 2 блоков по 50,5 МВт, энергозатраты равны 9,92 МДж/кВтч, капитальная стоимость 1120 долл./кВт. Во втором варианте мощность блока 109,1 МВт, энергозатраты 8,39 МДж/кВтч, капитальная стоимость 875 долл./кВт. Загрузка 75 процентов (см. табл. А-1 и А-2).

Таблица 7
Стоимость производства алкоголя из биомассы и угля¹

Расходы	У/Метанол ²	Б/Метанол ³	Б/Этанол ⁴
Годовое производство, 10 ⁹ л/год	2,103	0,384	0,261
Время работы, час/год	8 000	8 000	8 000
Капитальные затраты, млрд. долл.	1,436 ⁶	0,265 ⁶	0,098
Рабочий капитал, млн. долл.	53,1	13,0	- ⁷
Стоимость производства, цент/л			
Фиксированные вложения ⁸	9,321	9,420	5,13
Рабочий капитал ⁸	0,253	0,338	- ⁷
Древесина ⁹	-	3,14·P _б	4,39·P _б
Уголь ¹⁰	3,25·P _с	-	-
Эксплуатация	2,905	4,309	1,99
<i>Итого</i>	12,48+3,25·P _с	14,07+3,14·P _б	7,12+4,39·P _б
Общие затраты, центов/л в эквиваленте бензина ¹¹	21,15+5,51·P _с	23,85+5,32·P _б	8,90+5,49·P _б
Примеры: P _с = \$1,6/ГДж ¹² , P _б = \$1,6/ГДж, ¹²	30,0	36,1	21,5

¹ Расчеты производились при ставке на фиксированный (рабочий) капитал в 13,65% (10%), определенной на основе банковской ставки в 10%, времени жизни установки в 15 лет и страховке в 0,5%.

² У/Метанол - установка газификации угля фирмы "Тексако" с агрегатом синтеза метанола; эффективность преобразования угля в метанол - 55,7%.

³ Б/Метанол - установка газификации биомассы Института технологии газа с агрегатом синтеза метанола; эффективность преобразования биомассы в метанол - 57,7%.

⁴ Б/Этанол - перспективная разработка ферментного гидролиза с эффективностью преобразования биомассы в этанол в 53,5%, которая может быть создана к 2000 году.

⁵ При производительности в 1,74 тонны сухой массы в сутки, загрузке в 91% и выходе этанола в 450 литров этанола (23,5 МДж/л) на тонну сухой биомассы.

⁶ Стоимость установки преобразования угля в метанол - 1,29 млрд. долл., а для биомассы в метанол - 238 млн. долл. С учетом времени постройки в три года стоимость возрастает до 1,436 млрд. долл. и 265 млн. долл. соответственно.

⁷ Включено в капитальную стоимость.

⁸ При ставках на капитал согласно примечанию 1.

⁹ P_б - стоимость биомассы в долларах за 1 ГДж.

¹⁰ P_с - стоимость угля в долларах за 1 ГДж.

¹¹ При переделке двигателей на этанол 1 ГДж этанола будет эквивалентен 1,2 ГДж бензина, так что 1 л метанола (этанола) будет эквивалентен 0,59 (0,8) л бензина.

¹² Для установки в центральных штатах США при сжигании угля из Иллинойса.

¹³ Так же, как и в табл. 5, подразумевается закупка невысушенной биомассы.

Таблица 8
Глобальные размеры отходов сельскохозяйственного производства (ЭДж/год)

Лесное хозяйство¹			
Отходы лесозаготовок ²			
	Дрова		0,7
	Отходы химической обработки		2,7
	Отходы лесоустройства		0,8
	<i>Итого</i>		4,2
Отходы деревообработки ³			
	Опилки и стружка		3,6
	Обрезки		6,2
	<i>Итого</i>		9,8
Сельское хозяйство¹			
	Сахарный тростник ⁶		7,6
	Пшеница ⁷		12,9
	Рис ⁷		10,6
	Кукуруза ⁷		7,3
	Ячмень ⁷		3,8
	<i>Итого</i>		42,2
Всего			56,2
<p>¹ Теплотворная способность древесных отходов 20 ГДж/т, а сельскохозяйственных отходов - 15 ГДж/т сухой массы.</p> <p>² E.D. Larson, "Biomass-Gasifier/Gas Turbine Application in the Pulp and Paper Industry: an Initial Strategy for Reducing Electric Utility CO₂ Production", in Proceedings of the Ninth EPRI Conference on Coal Gasification Power Plants, Palo Alto, California, 17 - 19 October, 1990. При оценке не учитывались листья, сучья, ветки и корни.</p> <p>³ Объем отходов полагался равным 30% при производстве досок (примечание 4) и 52% при производстве панелей (примечание 5) при общем объеме производства в 600 миллионов кубометров.</p> <p>⁴ Процент отходов на опилки и стружку оценивался по американской статистике 1976 года (34,7 млн.т сухих отходов на 115,4 млн.т продукции).</p> <p>⁵ Процент отходов на обрезки оценивался по американской статистике 1976 года (76,4 млн.т сухих обрезков на 115,4 млн.т продукции).</p> <p>⁶ Теплотворная способность выжимок считалась равной 2,8 ГДж/т, а листьев и верхушек - 5,0 ГДж/т (для невысушенной массы) при общем производстве сахарного тростника в 968 млн.т.</p> <p>⁷ Общее производство зерновых в мире в 1986 г. (US Department of Agriculture, "Statistical Abstract of the United States 1990", Washington, DC, US Government Printing Office, 1990. Коэффициент поправки на производство отходов рассчитывался по американской статистике (см. примечание 8).</p>			
Зерновые	1986 (млн.т)	Коэффициент	Отходы (млн.т)
Пшеница	538	1,6	861
Рис	473	1,5	710
Кукуруза	485	1,0	485
Ячмень	182	1,4	255
<p>⁸ Производство зерновых культур и отходов в США согласно работам US Department of Commerce, "Agricultural Statistics 1978", Washington, DC, US Government Printing Office, 1978 и Office of Technology Assessment, "Energy from Biological Processes, v. II, Technical and Environmental Analyses", September 1980.</p>			
Зерновые	1976 (млн.т)	Отходы (млн.т)	Коэффициент
Пшеница	57,2	90,7	1,6
Рис	5,2	7,8	1,5
Кукуруза	155,6	155,3	1,0
Ячмень	8,5	12,1	1,4

Таблица 9

Сценарии сокращения эмиссии CO₂ при производстве энергии из биомассы¹ (ГтС/год)

2025	• Электричество и алкоголь из сахарного тростника ²	0,7
	Электричество из отходов деревообработки ³	0,2
	Электричество из прочих отходов ⁴	0,8
	<i>Итого</i>	1,7
2050	Электричество и алкоголь из сахарного тростника	0,7
	Электричество из отходов деревообработки	0,2
	Электричество из прочих отходов	0,9
	Электричество из биомассы ⁵	3,6
	<i>Итого</i>	5,4

¹ Сценарий для сокращения глобальной эмиссии CO₂ от уровня В1 до уровня D1 (см. табл.1), ограниченный производством электроэнергии из биологических источников.

² Предполагается, что производство сахарного тростника будет расти со скоростью 3% в год (с 968 млн.т в 1987 г. до 2976 млн.т в 2025 г.), что электричество будет производиться с эффективностью 885 кВтч на тонну, и что 45% сахарного тростника будет перерабатываться в этанол для замены бензина, см. J.M. Ogden, R.H. Williams, M.E. Fulmer, "Cogeneration Applications of Biomass-Gasifier/Gas Turbine Technologies in the Cane Sugar and Alcohol Industries: Getting Started with Bioenergy Strategies for Reducing Greenhouse Gas Emissions", in Proceedings of the Conference on Energy and Environment in the 21st Century, Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1990.

³ Предполагается, что скорость увеличения производства отходов составит 3,1% в год, со 105 млн.т в 1988 г. до 330 млн.т в 2025 году, и что электричество будет производиться с эффективностью 2544 кВтч на тонну, см. E.D. Larson, "Biomass-Gasifier/Gas Turbine Applications in the Pulp and Paper Industry: an Initial Strategy for Reducing Electric Utility CO₂ Emissions", in Proceedings of the Ninth EPRI Conference on Coal Gasification Power Plants", Palo Alto, California, 17 - 19 October 1990.

⁴ Поскольку производство прочих отходов велико по сравнению с производством отходов от сахарного тростника и деревообработки (см. табл. 8), то предполагается, что при использовании части этих отходов для выработки электроэнергии можно получить сравнимое уменьшение глобальной эмиссии углекислого газа.

⁵ В предположении, что биомасса будет производиться на 600 млн. га со средней урожайностью 12 тонн на гектар в год, и что она будет использована для замены угля при уменьшении эмиссии углекислого газа на 3,6 ГтС в год.

Таблица А-1

Оценка стоимости производства электроэнергии из угля и биомассы
на газотурбинных установках (в центах/кВтч)

	CIG/STIG ¹	BIG/STIG ²	CIG/ISTIG ¹	BIG/ISTIG ²
Горючее ¹	1,011·P _c	0,992·P _b	0,855·P _c	0,839·P _b
Затраты на эксплуатацию ²	0,30	0,20	0,28	0,19
Обслуживание ³	0,42	0,32	0,33	0,24
Накладные расходы ⁴	0,14	0,10	0,12	0,09
Вода ⁵	0,028	0,028	0,026	0,026
Катализаторы ⁶	0,018	-	0,016	-
Утилизация отходов ⁷	0,071	0,069	0,060	0,059
Побочное производство H ₂ SO ₄ ⁸	-0,273	-	-0,231	-
Капитальные затраты ⁹	1,68	1,34	1,34	1,04
Всего	2,38 + 1,011·P_c	2,06 + 0,992·P_b	1,94 + 0,855·P_c	1,65 + 0,839·P_b

¹ P_c и P_b - стоимость угля и биомассы в долларах на 1 ГДж. Энергозатраты на 1 кВтч электроэнергии равны 10,11 МДж/кВтч (для CIG/STIG) и 8,55 МДж/кВтч (для CIG/ISTIG). Характеристики установок рассчитывались в предположении их модификации с угля на биомассу. Эффективность газификации биомассы считалась равной эффективности газификации угля. Для извлечения серной кислоты при сжигании биомассы необходима инъекция пара низкого давления в турбину, что приводит к небольшому увеличению мощности установки и понижению энергозатрат до 9,92 МДж/кВтч (для BIG/STIG) и 8,39 МДж/кВтч (для BIG/ISTIG).

² Для работы на установке на угле требуются три оператора для газогенератора, четыре для системы очистки газа и три для электрогенератора. При оплате в 22,55 доллара в час расходы на персонал составят 1,977 млн. долл. в год. Для работы на установке на биомассе потребуется на три человека меньше, и расходы будут равны 1,384 млн. долл. в год.

³ Расходы по обслуживанию включают 40% заработной платы и 60% расхода на материалы и оборудование.

⁴ Накладные расходы принимаются равными 30% от общей стоимости эксплуатации и обслуживания.

⁵ Для всех систем расходы на воду для охлаждения принимаются равными 189 тыс. долл. в год.

⁶ Стоимость катализаторов для установок на угле составляет 121 тыс. долл. в год (для установок на биомассе эти расходы не нужны).

⁷ Стоимость утилизации твердых отходов для установок на угле и на биомассе считается одинаковой.

⁸ Побочный продукт (серная кислота) производится только на угольных установках.

⁹ Капитальные расходы обсуждаются в табл. А-2.

Таблица А-2
Оценка капитальных затрат производства электроэнергии из угля и биомассы
на газотурбинных установках (в долларах/кВт)

	CIG/STIG ¹	BIG/STIG ²	CIG/ISTIG ¹	BIG/ISTIG ²
Капитальные затраты процесса				
Обращение с топливом	44,4	44,4	41,2	41,2
Воздуходувная система	15,1	15,1	10,8	10,8
Газогенератор	180,5	180,5	93,3	93,3
Физическая очистка газа	9,9	9,9	8,6	8,6
Химическая очистка газа	197,4	0,0	169,3	0,0
Газовая турбина	330,4	330,4	287,7	287,7
Механические подсистемы	45,1	45,1	37,0	37,0
Электрические подсистемы	72,9	72,9	54,3	54,3
Помещения для персонала	73,5	73,5	68,1	68,1
<i>Итого</i>	<i>969,2</i>	<i>771,8</i>	<i>770,3</i>	<i>601,0</i>
Прочие затраты ³	437,7	348,7	347,8	271,5
Начальная загрузка химикатов	2,8	0,0	2,6	0,0
Стоимость земли	1,5	1,5	1,5	1,5
Всего	1411	1122	1122	874
<p>¹ Установка CIG/STIG включает две газовых турбины с электрической мощностью 50,5 МВт с газогенератором Lurgi Mark IV. Установка CIG/ISTIG включает газовую турбину с электрической мощностью 109,1 МВт с тем же газогенератором Lurgi Mark IV. Стоимость рассчитывалась согласно руководству EPRI Technical Assessment Guide (J.C. Corman, "System Analysis of Simplified IGCC Plants", General Electric Company, Scenectady, NY, Report of Department of Energy Contract No. DE-AC21-80ET14928, September 1986).</p> <p>² Мощность соответствующих установок на биомассе полагалась равной 103,0 и 111,2 МВт, а их стоимость считалась такой же, как для установок на угле (за исключением системы очистки от серы, содержание которой в биомассе пренебрежимо мало).</p> <p>³ Прочие расходы включают в себя расходы на инженерные коммуникации и резервные расходы на процесс и проект; кроме того, в них учитываются процентные ставки на период строительства (два года).</p>				

ССЫЛКИ И ПРИМЕЧАНИЯ

1. F.J. Dyson, "Can We Control the Carbon Dioxide in the Atmosphere", *Energy*, 2 (1977), pp. 287-291.
2. G. Marland, "The Prospect of Solving the CO₂ Problem through Global Reforestation", US-DOE/OER Report DOE/NBB-0082, 1988.
3. R. A. Houghton, "The Future Role of Tropical Forests in Affecting the Carbon Dioxide Concentration of the Atmosphere", *Ambio*, 19, 4 (1990), pp. 204-209.
4. D.A. Lashoff, D.A. Tirpak, eds., "Policy Options for Stabilizing the Global Climate" Office of Policy, Planning and Evaluation, US Environmental Protection Agency, draft report to Congress, February 1989.
5. D.O. Hall, F. Rosino-Calle, "CO₂ Cycling by Biomass: Global Bioproductivity and Problems of Devegetation and Afforestation", chapter 9 in "Balances in the Atmosphere and the Energy Problem", E.W.A. Lingemon, European Physical Society Symposium, Geneva, 1990.
6. M.C. Trexler, "Reforesting the United States to Combat Global Warning", World Resources Institute, Washington, DC, July 1990.
7. L.L. Wright, R.L. Graham, A.F. Turnhollow, "Short Rotation Woody Crop Opportunities to Mitigate Carbon Dioxide Buildup", presented at the North American Conference on Forestry Responses to Climate Change, Washington, DC, May 1990.
8. K.F. Wiersum, P. Ketner, "Reforestation: a Feasible Contribution to Reducing the Atmospheric Carbon Dioxide Content?", in P.A. Okken, R. Swart, S. Zwerver, eds., "Climate and Energy: the Feasibility of Controlling CO₂ emissions", pp. 107-124 (Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989).
9. J.L. Kulp, "The Phytosystem as a Sink for Carbon Dioxide", EPRI Report EN-6786, May 1990.
10. N. Myers, "The Greenhouse Effect: A Tropical Forestry Response", *Biomass*, 18 (1989), pp. 73-78.
11. S. Postel, L. Heise, "Reforesting the Earth", *Worldwatch Paper 83*, Washington, DC, 1988.
12. R.J. Moulton, K.R. Richards, "Costs of Sequestering Carbon through Tree Planting and Forest Management in the United States", USDA Forest Service General Technical Report, December 1990.
13. ICF, Inc., "Preliminary Technology Cost Estimates of Measures Available to Reduce US Greenhouse Gas Emissions by 2010", study prepared to the US Environmental Protection Agency, August 1990.
14. D.B. Botkin, "Can We Plant Enough Trees to Absorb all the Greenhouse Gases?" presented at the University of California Global Climate Change Workshop No. 2: Energy Policies to Address Global Climate Change, University of California at Davis, 6-8 September 1989.
15. D.O. Hall, "Carbon Flows in the Biosphere: Present and Future," *Journal of the Geological Society*, 146 (1990), pp. 175-181.
16. W.D. Nordhaus, "The Cost of Slowing Climatic Change: A Survey," *The Energy Journal*, 12, 1 (1991).
17. D.J. Dudek and A. LeBlanc, "Offsetting New CO₂ Emissions: A Rational First Greenhouse Policy Step," *Contemporary Policy Issues*, 8 (1990), pp.29-42.
18. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums, eds., *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990), chapter 10.
19. World Resources Institute, *World Resources 1990-91*, (New York: Oxford University Press, 1990).
20. K. Kuusela, "Forest Products - World Situation," *Ambio*, 16, 2-3 (1987), pp.80-85.
21. C.A. Hendriks, K. Blok, and W.C. Turkenburg, "The Recovery of Carbon Dioxide from Power Plants," in P.A. Okken, R. Swart, and S. Zwerver, eds., *Climate and Energy: the Feasibility of Controlling CO₂ Emissions*, pp.107-124, (Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989).
22. C.A. Hendriks, K. Blok, W.C. Turkenburg, "Technology and Cost of Recovery and Storage of Carbon Dioxide from an Integrated Gasifier Combined Cycle Plant," unpublished manuscript, 1990.
23. R.H. Williams, "Innovative Approaches to Marketing Electric Efficiency," in T.B. Johansson, B. Bodlung, and R.H. Williams, eds., *Electricity: Efficient End Use and New Generation Technologies and Their Planning Implications*, (Lund, Sweden: Lund University Press, 1989).
24. E. Mills, D. Wilson, and T.B. Johansson, "Beginning to Reduce Greenhouse Gas Emissions Need Not Be Expensive," Invited Theme Paper for the Second World Climate Conference, Geneva, 29 October - 7 November, 1990.
25. K. Blok, E. Worrell, R.A.W. Albers, R.F.A. Cuelenaere, and W.C. Turkenburg, "The

- Cost-Effectiveness of Energy Conservation from the Point of View of Carbon Dioxide Reduction," paper prepared for the 13th World Energy Engineering Congress, Atlanta, 10-12 October, 1990.
26. Chem Systems, Inc., "Assessment of Cost of Production of Methanol from Biomass," report to the Solar Energy Research Institute, December 1989.
 27. Office of Policy Planning and Analysis, US Department of Energy, "The Potential of Renewable Energy," an Interlaboratory White Paper, SERI/TP-260-3674, 1990.
 28. E.D. Larson and R.H. Williams, "Biomass-Gasifier Steam-Injected Gas Turbine Cogeneration," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 112 (1990), pp.157-163.
 29. J.M. Ogden, R.H. Williams, and M.E. Fulmer, "Cogeneration Applications of Biomass Gasifier/Gas Turbine Technologies in the Cane Sugar and Alcohol Industries: Getting Started with Bioenergy Strategies for Reducing Greenhouse Gas Emissions," *Proceedings of the Conference on Energy and Environment in the 21st Century*, (Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1990).
 30. E.D. Larson, "Biomass-Gasifier/Gas Turbine Applications in the Pulp and Paper Industry: an Initial Strategy for Reducing Electric Utility CO₂ Emissions," *Proceedings of the Ninth EPRI Conference on Coal Gasification Power Plants*, Palo Alto, California, 17-19 October 1990.
 31. US Department of Energy, "Assessment of Costs and Benefits of Flexible and Alternative Fuel Use in the US Transportation Sector. Technical Report Three: Methanol Production and Transportation Cost," August 1989, based on a study prepared for the DoE's Office of Policy, Planning, and Analysis, by Chem Systems, Inc.
 32. W.T. Gladstone and F.T. Ledig, "Reducing Pressure on Natural Forests Through High-Yield Forestry," in *Forest Ecology and Management*, 35 (1990), pp. 69-78.
 33. G. Siren, L. Sennerby-Forsse, and S. Ledin, "Energy Plantations - Short Rotation Forestry in Sweden," in D.O. Hall and R.P. Overend, eds., *Biomass: Regenerable Energy*, (New York: John Wiley and Sons, 1987).
 34. "Main Conclusions and Proposals," in F.C. Hummel, W. Palz, and G.Grassi, eds., *Biomass forestry in Europe: a Strategy for the Future*, (London: Elsevier Applied Science, 1988).
 35. M.G.R. Cannell, "Physiological Basis of Wood Production," *Scandinavian Journal of Forest Research*, 4 (1989), pp.459-490.
 36. Food and Agriculture Organization of the United Nations, *FAO Production Yearbook Volume 41*, 1987.
 37. D.J. Parrish, D.D. Wolf, W.L. Daniels, J.S. Cundiff, and D.H. Vaughan, "A Five-Year Screening Study of Herbaceous Energy Crops," in D.L. Klass, ed., *Energy from Biomass and Wastes XIV*, (Chicago, Illinois: Institute of Gas Technology, 1990).
 38. J.H. Cushman and A.F. Turhollow, "Selecting Herbaceous Energy Crops for the Southeast and Midwest/Lake States," in D.L. Klass, ed., *Energy from Biomass and Wastes XIV*, (Chicago, Illinois: Institute of Gas technology, 1990).
 39. W. Fulkerson et al., *Energy Technology R&D: What Could Make a Difference? A study by the staff of the Oak Ridge National Laboratory*, volume 2, *Supply Technology*, ORNL-6541/V2/P2, December 1989.
 40. Office of Technology Assessment, *Energy from Biological Processes*, Congress of the United States, Washington DC, 1980.
 41. Green Mountain National Forest, "Developing Markets for Low Quality Wood: the Wood Supply in Bennington County and Southwestern Vermont," *Summary Report*, 5 October 1990.
 42. D.E. Earl, *Forest Energy and Economic Development*, (Oxford: Clarendon Press, 1975).
 43. Energy Information Administration, "International Energy Annual 1988," DOE/EIA-0219(88), United States Department of Energy, Washington DC, 1989.
 44. C.H. Strauss and L.L. Wright, "Woody Biomass Production Costs in the United States: An Economic Summary of Commercial Populus Plantation Systems," *Solar Energy*, 45, 2(1990), pp. 105-110.
 45. C.H. Strauss, S.C. Grado, P.R. Blankenhorn, and T.W. Bowersox, "Economic Valuations of Multiple Rotation SRIC Biomass Plantations," *Solar Energy*, 41, 2 (1990), pp. 207-2114.
 46. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Formulation of Response Strategies*, Report Prepared for IPCC by Working Group III, June 1990.
 47. J.T. Houghton, G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums, eds., *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*, (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990), *Policy markers Summary*.
 48. W. Vergara, N.E. Hay, and C.W. Hall, *Natural Gas: its Role and Potential in Eco-*

- conomic Development, Westview Special Studies in Natural Resource and Energy Management, (Boulder, Colorado: Westview Press, 1989).
49. J.R. Bolton and D.O. Hall, "Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy," *Annual Review of Energy*, 4 (1979), pp. 353-401, 1979.
 50. J. Coombs, D.O. Hall, and P. Chartier, *Plants as Solar Collectors: Optimizing Productivity for Energy: An Assessment Study, solar Energy R&D in the European Community, series E, volume 4: Energy from Biomass*, D. reidel Publishing Company, Dordrecht, 1983.
 51. "The Noordwijk Declaration on Atmospheric Pollution and Climatic Change," Ministerial Conference on Atmospheric & Climatic Change, Noordwijk, the Netherlands, November 1989.
 52. A. Grainger, "Estimating Areas of Degraded Tropical Lands Requiring Replenishment of Forest Cover," *International Treecrops Journal*, 5 (1988), pp. 1-2.
 53. W.M. Hao, M.H. Liu, and P.J. Crutzen, "Estimates of Annual and Regional Releases of CO_2 and Other Trace Gases from Fires in the Tropics," in J.J. Goldammer, ed., *Proceedings of the III International Symposium on Fire Ecology*, (Berlin: Springer, in press).
 54. New Farm and Forest Products Task Force, "New Farm and Forest Products - Responsive to the Challenges and Opportunities Facing American Agriculture," Report to the US Secretary of Agriculture, 1987.
 55. C.J. Weinberg and R.H. Williams, "Energy from the Sun," *Scientific American*, 262, 9 (September 1990).
 56. F.T. Ledig, "Improvement of Eucalyptus for Fuel and Fiber in California," in J.S. Pereira and J.J. Landsberg, eds., *Biomass Production by Fast-Growing Trees*, (Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989).
 57. I. Stjernquist, "Modern Wood Fuels," in J. Pasztor and L.A. Kristoferson, eds., *Bioenergy and the Environment*, (Boulder, Colorado: Westview Press, 1990).
 58. C.P. Mitchell, "Nutrients and Growth Relations in Short-Rotation Forestry," *Biomass*, 22 (1990), pp.91-105.
 59. D.S. DeBell, C.D. Whitesell, and T.H. Schubert, "Using N_2 - Fixing Albizia to increase Growth of Eucalyptus Plantations in Hawaii," *Forest Science*, 35, 1 (1989), pp.64-75.
 60. S. Linder, "Nutritional Control of Forest Yield," in *Nutrition of Trees*, Marcus Wallenberg Foundation Symposia, 6, Falun, Sweden, 1989, pp.62-87.
 61. C_3 - культуры обладают наиболее общим типом метаболизма углерода, найденным у большинства трав и деревьев умеренного пояса. C_4 - культуры, образцами которых служат многие тропические травянистые растения, используют слегка иной механизм поглощения CO_2 из атмосферы. Пшеница - типичная C_3 - культура, а кукуруза - C_4 - культура.
 62. J.P. Kimmins, "Modelling the Sustainability of Forest Production and Yield for a Changing and Uncertain Future," *The Forest Chronicle*, 6 (June 1990), pp.271-280.
 63. S.G. Nilsson, "Density and Species Richness of Some Forest Bird Communities in South Sweden," *Oikos*, pp.3920401, 1979.
 64. J.C. Cornman, "Systems Analysis of Simplified IGCC Plants," report prepared for the US Department of Energy by General Electric Corporate Research and Development, Schenectady, New York, ET-14928-13, September 1986.
 65. A.A. Pitriolo and L.E. Graham, "DOE Activities Supporting IGCC Technologies," in *Proceedings of a Conference on Integrated Gasification Combined Cycle Plants for Canadian Utility Applications*, chapter 1A, (Montreal: Canadian Electric Association, 1990).
 66. A. Ahlstrom Corporation, "Sydkraft AB, Sweden and A. Ahlstrom, Finland Goes Ahead with Unique Gasification Process," press release, November 1990.
 67. R.H. Williams, "Low-Cost Strategies for Coping with CO_2 Emission Limits," *The Energy Journal*, 11, 3 (1990).
 68. D.O. Hall and R.P. Overend, eds., *Biomass: Regenerable Energy*, (New York: John Wiley, 1987).
 69. D.C. Rinebolt, "Biomass Energy: a Maturing Technology," *Biologue*, 6,5 (1990), pp.20-23.