

УДК 504.064:330.15

## Перспективы производства биотоплива на основе энергетических культур. Экономические и экологические аспекты

Канд. биол. наук **Родькин О.И.** aleh.rodzkin@rambler.ru

**Черненко Е.В.** echernenok@mail.ru

Белорусский национальный технический университет  
220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости 65

Д-р биол. наук, профессор **Саевич К.Ф.** mygreenpochta@gmail.com

Белорусский государственный экономический университет  
220070, Республика Беларусь, г. Минск, Партизанский пр-т, 26

*Эффективное производство биомассы и биодизеля на основе энергетических культур требует всестороннего обоснования. Целью наших исследований является эколого-экономическая оценка выращивания энергетических культур перспективных для стран с умеренным климатом, таких как рапс, естественные многолетние травы, короткоцикловые плантации ивы и зерновые для получения соломы. Расчет себестоимости биотоплива и анализ экологического воздействия выполнены на основе использования метода оценки жизненного цикла продукции. Себестоимость биодизеля из рапса составила около 1,08 доллара за литр, что для условий Республики Беларусь на 54 % выше по сравнению со стоимостью дизельного топлива. При использовании биомассы для получения тепла себестоимость единицы энергии полученной из древесины ивы составила 1,64 доллара за гигаджоуль, что в 1,5 и в 1,8 раза выше, чем из биомассы естественной болотной растительности и соломы зерновых. Оценка степени воздействия энергетических культур на окружающую среду показала, что максимальное количество парниковых газов выбрасывается при производстве биодизеля на основе рапса и минимальное при производстве биотоплива из естественной болотной растительности. Положительный экологический эффект при производстве древесины ивы по сравнению с другими энергетическими культурами, обусловлен возможностью эффективного использования древесных плантаций для биологической рекультивации земель.*

*Ключевые слова:* энергетические культуры, биотопливо, эколого-экономическая оценка, возобновляемая энергетика.

DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-1-33-44

---

## The perspective of biofuel production on the base of energy crops. Economic and environmental aspects

Ph.D. **Rodzkin O.I.** aleh.rodzkin@rambler.ru

**Charnenak E.V.** echernenok@mail.ru

Belarusian national technical University  
220013, Republic of Belarus, Minsk, Nezavisimosti av., 65

D.Sc. **Saevich K.F.** mygreenpochta@gmail.com

Belarusian state University of Economics  
220070, Republic of Belarus, Minsk, Partizansky av., 26

*The efficient using of energy crops for biomass and biodiesel production requires the adequate and complex grounding. The goal of our research was economic and environmental assessment of energy crops production which are perspective for regions with moderate climate conditions, including rape for biodiesel, perennial natural grasses, short rotation coppice willow, straw of cereals. The prime cost of rape biodiesel was 1,08 USD per liter, that is in 54% higher to compare with ordinary diesel. Economic grounding and environmental impact analyses had been done on the base of Life Cycle Assessment method. Prime cost of energy unit obtained from willow wood was 1,64 USD per GJ that in 1,5 times higher to compare with natural grasses and in 1,8 times higher to compare with cereals straw. Environmental impact assessment showed that the biggest emission of greenhouse gases was connected with the rape cultivation and minimal with grasses cultivation. The positive environmental effect of biofuel production on the base*

*of willow cultivation in compare with other energy crops was connected with high potential of trees for biological reclamation of soils.*

**Keywords:** energy crops, biofuel, environmental assessment, economic assessment, renewable energy.

## Введение

Возобновляемая энергетика это одно из направлений зеленой или устойчивой экономики. Международным агентством по возобновляемой энергетике (IRENA) разработано два базовых сценария развития на период до 2050 года: сценарий Reference Case основан на текущей энергетической политике стран мирового сообщества и сценарий REmap-Case основан на прогнозах трансформации мировой энергетической системы с переходом на низко-углеродные технологии. По прогнозам, с 2015 по 2050 год доля возобновляемых источников энергии возрастет с 15 % до 27% по сценарию Reference Case и до 66% по сценарию REmap-Case. В соответствии со сценарием REmap-Case доля энергии полученной из биомассы в транспортном секторе составит 22% и в промышленности 19%[1].

Внедрение возобновляемой энергетики обуславливается, как поиском источников энергии, способных заменить ископаемое топливо в ближайшем или отдаленном будущем, так и перспективой снижения воздействия на окружающую среду. Направления использования возобновляемой энергетики зависят от ряда факторов и в первую очередь от климатических условий региона. Например, в странах с морским климатом и постоянными устойчивыми ветрами эффективным направлением является строительство установок по использованию энергии ветра, для регионов с тропическим и субтропическим климатом установка солнечных батарей и т.д. Вторым по значимости фактором является развитие технологий, что позволяет, например, эффективно использовать солнечные батареи в скандинавских странах или в центральных регионах России и даже Сибири. Солнечные установки в настоящее время эксплуатируются в Челябинской, Саратовской, Астраханской и других областях страны. Тем не менее, развитие солнечной и ветровой энергетике требует дополнительных дотаций и более эффективным направлением для условий центральной и северной России, так же как и Беларуси является биоэнергетика. В этом случае биологический материал преобразуется в энергию в результате процессов сжигания или анаэробного сбраживания. Рынок биотоплива так же, как и других возобновляемых источников энергии непосредственно связан с котировками мировых цен на традиционные энергоносители. Среднегодовые цены на нефть, достигнув исторического максимума в 2011–2013 годах резко снизились в 2015-2016 годах, но вновь имеют устойчивый рост в последние годы. Как результат, объем производства биодизеля, например, имевший устойчивую тенденцию к росту на протяжении 2000-2010 годов, замедлился, начиная с 2012 года, но уже в 2017 году мировое производство снова увеличилось. Это позволяет предположить, что интерес к альтернативным источникам энергии вслед за повышением цен на традиционные энергоносители будет расти.

Биомасса для энергетических целей может быть получена как на невозобновляемой, так и возобновляемой основе. К невозобновляемым источникам относится, например, энергия, полученная из древесины без восстановления лесного массива. Для получения возобновляемой энергии можно использовать отходы органического происхождения, растительные остатки, энергетические культуры и т.д. [2]. К энергетическим относятся культуры, биомасса которых может быть использована в качестве энергоносителя для производства топлива для двигателей внутреннего сгорания (сахарный тростник, рапс, пальмы), биогаза для отопления или выработки электричества (силосные культуры, навоз крупного рогатого скота, птичий помет), выработки тепла (древесина, солома, многолетние и однолетние травы). К энергетическим культурам можно отнести посевы зерновых и других сельскохозяйственных культур, побочная продукция которых (солома) так же является биотопливом. Использование органических или лесных отходов или продуктов переработки лесной промышленности не требует выделения дополнительных площадей, что является преимуществом по сравнению с энергетическими культурами. Производство биомассы на основе энергетических культур необходимо обосновывать с учетом обеспеченности продовольствием растущего населения планеты [3]. Тем не менее, площади энергетических посадок, начиная с 90-х годов прошлого века, имеют неуклонную тенденцию к росту [4], и это можно объяснить рядом факторов:

- Энергетические культуры можно высаживать отдельными крупными массивами, расположенными вблизи энергетических объектов, что позволяет улучшить логистику их использования;
- Прирост биомассы на единицу площади и, следовательно, объем ее производства является стабильным и прогнозируемым показателем;
- Энергетические культуры могут выращиваться на различных по плодородию, степени деградации и загрязненности почвах, что позволяет решать вопросы охраны и восстановления природных экосистем.
- Сравнительно высокий урожай биомассы энергетических культур, как в настоящее время, так и в перспективе может быть получен на низкоплодородных и загрязненных землях, на неудобьях, на заболоченных землях, где выращивание традиционных сельскохозяйственных культур не эффективно или вовсе невозможно.

– Энергетические культуры не требуют использования пресной воды для орошения и стимулирования продуктивности, как например, плодовые и овощные культуры.

Сельскохозяйственный сектор обеспечивает около 10% биомассы от ее ежегодного производства на энергетические цели. С 2000 по 2014 годы площади посевов, например, рапса увеличились с 25,8 до 36,1 миллионов гектаров. При этом доля площадей используемых для производства биотоплива ежегодно возрастают на величину 2,9% [5].

Целью данной публикации является эколого-экономическая оценка перспективы выращивания энергетических культур для стран с умеренным климатом. Наши исследования были сфокусированы на энергетических культурах традиционных для климата умеренного пояса России и Беларуси: масличный рапс, зерновые злаки, многолетние травы, ива.

Рапс является основным источником биодизельного топлива, или биодизеля. Как правило, биодизель используют в смеси с дизельным топливом, полученным из нефти. Пропорции смешивания зависят от национальных стандартов [6]. Крупнейшими в Европе производителями и потребителями биодизеля являются Австрия, Франция и Германия [7].

В качестве биотоплива можно использовать как естественные, так и культивируемые многолетние травы. Урожайность культивируемых многолетних трав может достигать очень высоких величин. Например, в Средиземноморских климатических условиях урожайность гигантского тростника составила от 39 до 49 тонн с гектара [8]. Рынок биотоплива которое производится основе многолетних трав, в последние годы имеет устойчивую тенденцию к росту [9]. В этой связи перспективным направлением является использование в качестве биотоплива естественной растительности (тростник, канареечник, осока) с осушенных болотных территорий. Такой подход успешно реализуется в Германии, Польше, Финляндии, Швеции, Эстонии и других странах [10].

Одним из источников биотоплива является биомасса быстрорастущих видов деревьев, которые выращиваются на специальных энергетических плантациях. Существуют два направления создания таких плантаций. Энергетические плантации на основе сосны, березы или лиственницы, обеспечивают производство 150-200 м<sup>3</sup> топливной древесины с гектара при сроке первой уборки 20-25 лет с момента посадки [11]. И второе направление, которое активно развивается в европейских и других странах это выращивание короткоцикловых плантаций SRC (short rotation coppice), которые обеспечивают первую уборку древесины на 3-4 год с начала посадки и позволяют получать урожай каждые три последующих года без существенного снижения продуктивности. Срок производственной эксплуатации таких плантаций составляет 20-25 лет и за этот период можно получить 7-8 урожаев древесины. Для создания таких плантаций используются специальные виды и сорта ивы и тополя, отличающиеся быстрым ростом и интенсивным отращиванием после уборки [12]. Рост площадей короткоцикловых посадок, максимальный уровень которого приходился на 70-90-е годы прошлого века, несколько замедлился с начала 2000-х. Тем не менее, короткоцикловые посадки распространены в странах Евразии и Северной и Южной Америки. Видовой ассортимент короткоцикловых культур зависит от климатических условий региона [13, 14, 15]. Только на европейском континенте под короткоцикловыми культурами занято свыше 55 тысяч гектаров [16]. Основные площади в европейских странах приходятся на тополя и ивы. Интерес к иве обусловлен ее экологической пластичностью, что позволяет получать урожай в широком диапазоне климатических и почвенных условий. Среднегодовой выход древесины ивы может достигать 10-15 т сухой массы с гектара [17].

Солома зерновых и других сельскохозяйственных культур так же является возобновляемым источником биотоплива. Объемы использования соломы на региональном уровне зависят от ряда факторов, в первую очередь от ее использования в кормовых целях или в качестве удобрения для повышения плодородия почвы [18]. К другим важным факторам относится технологичность использования соломы, включая режимы сжигания на энергоустановках. Наличие в соломе ряда щелочных элементов стимулирует образование шлаков и повышенную коррозию оборудования, что необходимо учитывать при планировании ее использования. Энергетическая эффективность использования соломы в качестве биотоплива определяется ее удельной теплотой сгорания [19, 20]. Солома для энергетических целей используется в ряде европейских стран, а наиболее высокий удельный уровень производства характерен для Дании [21]. Солома является растительным остатком таких культур как пшеница, рожь, тритикале, ячмень, рапс, гречиха и др. Эти культуры занимают значительные площади в структуре землепользования.

### Материалы и методы исследований

Исследования проводились в 2010-2017 годах в ряде регионов Республики Беларусь. В качестве объектов исследований использовались энергетические культуры наиболее типичные для климатических условий умеренного пояса России и Беларуси: рапс, естественные многолетние травы, быстрорастущая ива, зерновые злаки. Территория Беларуси разделена на три агроклиматические области: центральную, южную и северную, которые различаются по величине вегетационного периода, количеству осадков и другим показателям. Быстрорастущие ивы были высажены во всех трех областях на различных по качеству и плодородию почвах, в

том числе деградированных и загрязненных. Для посадки использовали сорт ивы Jogg, шведской селекции. Оценку рапса и зерновых культур проводили на полях хозяйств центральной агроклиматической зоны страны. Эксперименты с естественными многолетними травами проводились на выработанных после добычи торфа площадях южной агроклиматической зоны.

Для оценки экологического воздействия и расчета себестоимости биотоплива применяли метод оценки жизненного цикла (ОЖЦ), [22], который активно используется для проведения исследований в области биоэнергетики [23]. Технологический цикл производства биотоплива разбивался на ряд единичных процессов, связанных между собой материальными и энергетическими потоками. Единичные процессы в свою очередь включали технологические операции количество которых зависит от вида биотоплива. Технологическая карта производства биодизеля включала 32 технологических операции которые были разбиты на три взаимосвязанных блока: получение семян рапса в поле и их транспортировка на предприятие по переработке маслосемян в масло; очистка, сушка и прессование семян и производство собственно биодизеля. Технологическая карта производства древесины из растений ивы включала 31 технологическую операцию которые разбиты на блоки: основная и предпосевная обработка почвы с внесением удобрений; посадка, уход за посадками, уборка маточных плантаций, уборка плантаций и измельчение древесины, перепашка плантаций. Технологическая карта производства биотоплива из естественной болотной растительности включала 9 операций. Солома рассматривалась как побочная продукция производства зерна. Поэтому в технологическую карту были включены только 6 операций связанные с послеуборочной подготовкой соломы. Для расчетов себестоимости производства биотоплива были взяты единые тарифы, основанные на практической деятельности предприятий:

- Срок службы сельскохозяйственной техники – 10 лет;
- Расчет амортизационных отчислений в зависимости от времени работы техники на основе технологической карты;
- Стоимость дизельного топлива – 0,7 доллара за литр;
- Заработная плата – 2,8 доллара за час;
- Земельный налог – 1,2 доллара за гектар для естественной болотной растительности и быстрорастущей ивы и 3,0 доллара для рапса. Земельный налог зависит от кадастровой оценки земель. Биомасса многолетних трав и ивы получена на землях сравнительно низкого качества с баллом пашни – 25; семена рапса на землях с баллом пашни – 35.
- Стоимость электроэнергии – 0,12 доллара за кВт/час;
- Стоимость азотных удобрений – 196 долларов за тонну;
- Стоимость фосфорных удобрений – 460 долларов за тонну;
- Стоимость калийных удобрений – 135 долларов за тонну;
- Стоимость пестицидов 10–22 доллара за литр, в зависимости от вида химиката.

Определение удельной теплоты сгорания биомассы проводили при полном сжигании образца [24]. Полученные данные обрабатывались на основе статистических программ Excel и Sigma Plot 11.2.

За рамками наших исследований остались энергетические культуры, которые как показала практика, являются менее пригодными для климатических условий Беларуси: тополь, эвкалипт, мискантус, сахарный тростник и т.д. В данной работе отсутствует детальный анализ рынка биотоплива, так как одной из задач исследований была сравнительная оценка себестоимости производства биотоплива различных видов, но не рентабельности его реализации.

## Результаты исследований

### *Экономическая оценка производства биотоплива*

Биотопливо это биомасса, различного происхождения, которая может быть использована в качестве газообразного, жидкого (биодизель) или твердого топлива для получения энергии. Семена рапса используются для получения масла и далее биодизеля. Схематически жизненный цикл производства биодизеля можно представить в виде ряда этапов: выращивание семян рапса, производство биодизеля, использование биодизеля. Каждый этап состоит из отдельных технологических (единичных) процессов.

Например, этап «выращивание рапса» включает ряд единичных процессов, связанных между собой (рис. 1). Каждый единичный процесс можно представить как отдельный этап производства, который включает в себя использование материалов (продукции) и энергии, преобразование продукции в новое качество и воздействие на окружающую среду. Этап «производство биодизеля» учитывает затраты на транспортировку семян, прессование, этерификацию рапсового масла и другие процессы. Этап «использование биодизеля» включает затраты на транспортировку, заправку транспорта и т.д. Разделение на единичные процессы предусмотрено методикой ОЖЦ и позволяет определить воздействие на окружающую среду процесса производства продукции в целом и на отдельных этапах. Дифференциация процессов позволяет наиболее эффективно разрабатывать и внедрять мероприятия с целью снижения воздействия на окружающую среду.



Рис. 1. Блок-схема. Выращивание рапса (Анализ авторов)

Согласно полученным результатам себестоимость биодизельного топлива составила около 1,08 доллара за литр. По оценкам зарубежных исследователей себестоимость рапсового масла может составлять более 1,6 евро за литр [25]. Такая существенная разница объясняется более низкой стоимостью материальных и трудовых ресурсов в Республике Беларусь по сравнению со странами ЕС. Например, стоимость дизельного топлива в стране составляет около 0,7 доллара за литр. Тем не менее, себестоимость биодизеля для условий Республики Беларусь на 54% выше по сравнению с рыночной стоимостью дизельного топлива из нефти.

Твердая биомасса древесины или соломы может быть использована для получения биогаза или прямого сжигания для производства тепловой энергии. Наши расчеты строились исходя из второго варианта. При этом все виды биомассы были приведены к одинаковым условиям (влажность и степень измельчения) для объективного сравнения. Результаты расчетов себестоимости единицы энергии с учетом теплотворности биомассы представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Себестоимость биомассы и единицы энергии полученной из древесины ивы, соломы зерновых культур и сена болотной растительности\***

Биомасса	Влажность %	Степень измельчения, мм	Теплота сгорания, кДж/кг	Себестоимость биомассы, \$/тонну	Себестоимость энергии, \$/ГДж
Древесина	10	До 5	18500	30,5	1,64
Солома зерновых	10	До 5	16000	14,4	0,90
Солома рапса	10	До 5	15500	17,2	1,11
Сено	10	До 5	15500	16,4	1,06

\*Расчеты авторов

Наиболее высокая себестоимость была для биомассы ивы. Расчеты себестоимости древесины ивы проводились для плантации площадью 100 га, которая обеспечивает рентабельность ее производства. При снижении размера себестоимость будет возрастать вследствие увеличения амортизационных затрат при использовании специализированной для короткоцикловых древесных культур уборочной техники. Рыночная

стоимость измельченной древесины (щепы) в Беларуси является нестабильной величиной и может колебаться от 30 до 60 долларов за тонну. Себестоимость получения одного гигаджоуля энергии (с учетом теплотворности биомассы) для ивы так же была выше, чем для остальных культур. При расчете себестоимости соломы не принимались в расчет затраты, связанные с производством основной продукции (зерна).

### *Оценка экологической эффективности производства биотоплива*

Экологическая эффективность производства биотоплива на основе энергетических культур может быть оценена на основе следующих факторов:

*Оценка воздействия на окружающую среду как результат внесения минеральных удобрений и химических средств защиты растений (пестицидов)*

Рапс является одной из наиболее требовательных к условиям выращивания сельскохозяйственных культур. Для него пригодны только плодородные, хорошо структурированные почвы, с высоким уровнем содержания питательных элементов и с близкой к нейтральной реакции среды. Обязательным условием является выбор оптимальной предшествующей культуры в севообороте, что значительно сужает сектор сельхозгодий для выращивания рапса. Для получения высокого урожая рапс требует соответствующего уровня химизации. Необходимо внесение высоких доз как макроудобрений (азот, фосфор, калий), так и микроудобрений (цинк, молибден, марганец). Содержащиеся в минеральных удобрениях элементы необходимые для роста и развития растений в высоких дозах отрицательно влияют на компоненты окружающей среды. Фосфор это основной элемент, стимулирующий эвтрофикацию водоемов. В результате снижаются потребительские качества воды и рекреационный потенциал водного объекта, происходит зарастание «цветение» водоемов, изменение и нарушение биологического разнообразия, и другие негативные последствия. Высокие дозы азота, цинка и марганца отрицательно сказываются на ферментативной и микробиологической активности почвенных экосистем [26].

Для получения высоких урожаев рапс требует внесения нескольких видов пестицидов, каждый из которых оказывает специфическое отрицательное воздействие на почвенные и водные экосистемы. Обязательным условием является внесение гербицидов для контроля сорной растительности, в том числе сплошного действия (глифосатсодержащие препараты). Рапс является культурой чувствительной к воздействию болезней и вредителей. Это обуславливает дополнительное использование химических средств защиты для протравливания семян и послеуборочных обработок. Неравномерность созревания семян рапса, в ряде случаев требует дополнительной обработки десикантами – химическими препаратами ускоряющими созревание. Эти технологические приемы обуславливают серьезную дополнительную нагрузку на окружающую среду.

Наиболее требовательными из зерновых злаков являются озимая и яровая пшеница и наименее требовательным овес. Оценивая зерновые культуры в целом можно констатировать, что они не требуют такого тщательного ухода как рапс, и, следовательно, нагрузка на окружающую среду при их выращивании не столь значительна.

Ива является растением не требовательным к условиям произрастания, которое в естественных условиях имеет обширный ареал распространения и обладает высокой степенью устойчивости к факторам внешнего воздействия. Плантации быстрорастущей ивы могут быть заложены на различных типах почв, в том числе низкоплодородных и деградированных. При подготовке участка к закладке плантации обязательным условием является внесение почвенных гербицидов и минеральных удобрений. Но следует учитывать, что однократно заложённая плантация произрастает на одном месте 20-25 лет без существенного снижения продуктивности. На экспериментальных плантациях ивы не было необходимости в проведении специальных защитных мероприятий против болезней или вредителей. Следовательно, нагрузка на окружающую среду при получении биомассы ивы в несколько раз меньше по сравнению рапсом и зерновыми культурами.

Естественные многолетние травы, сено которых можно использовать в качестве биотоплива, как правило, не требуют дополнительной защиты от сорняков, болезней и вредителей, так же как и внесения удобрений, и с точки зрения химизации, их выращивание оказывает наименее существенное воздействие на окружающую среду.

*Оценка выбросов загрязнителей, в том числе парниковых газов в окружающую среду при производстве и сжигании биотоплива.*

Характеристика загрязнения атмосферного воздуха в процессе жизненного цикла биодизеля представлена на рис. 2.

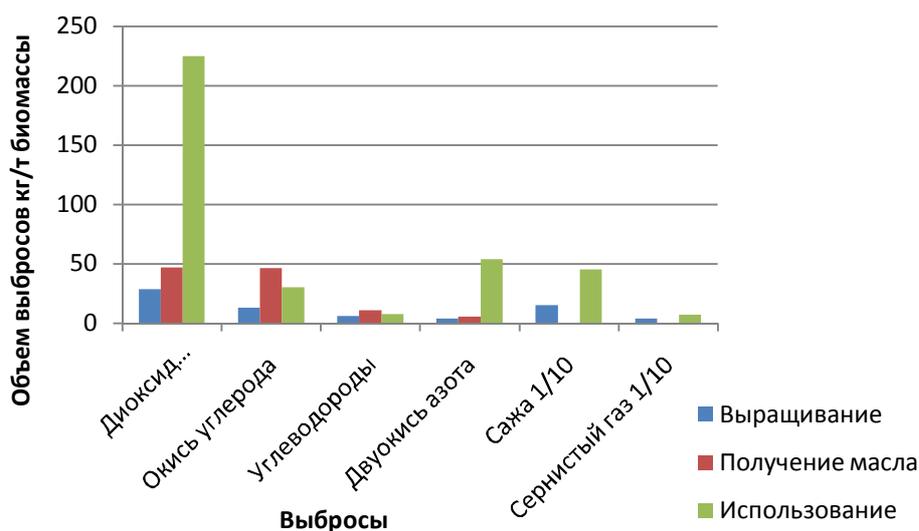


Рис. 2. Выбросы в жизненном цикле биодизеля (Расчеты авторов)

Выбросы парниковых газов в энергетическом секторе рассчитываются исходя из объемов использования традиционного топлива. При сжигании биомассы количество  $CO_2$ , которое выбрасывается в окружающую среду, утилизируется растениями в процессе фотосинтеза, и биомасса рассматриваемых нами источников относится к категории возобновляемой энергии и считается «нейтральным» топливом. Тем не менее, при экологической оценке биомассы необходимо учитывать выбросы, связанные с использованием традиционного топлива (дизельного, природного газа, бензина), на этапах ее получения и использования. Для рапса объем выбросов двуокиси углерода на этапах производства масла составляет 756 кг, в то время как выбросы при использовании топлива составили 2250 кг. Таким образом, в процессе жизненного цикла биодизеля около 33% приходится на выбросы дизельного топлива необходимого в процессе получения рапсового масла. Этот показатель сопоставим с результатами ОЖЦ, выполненными другими исследователями [27].

Оценка выбросов загрязнителей в атмосферный воздух для плантаций ивы проводилась из расчета всего срока ее эксплуатации (22 года). Это обусловлено тем обстоятельством, что некоторые виды работ (например, внесение гербицидов, посадка, подготовка и раскорчевка плантации) проводятся однократно, другие (внесение минеральных удобрений, сушка, уборка) с трехлетней периодичностью и объективные данные могут быть получены при учете всех видов работ в соответствии с технологией возделывания ивы за весь срок. Результаты расчетов выбросов  $CO_2$  при получении и использовании древесины ивы в качестве биотоплива за весь срок эксплуатации плантации представлены на рис. 3.

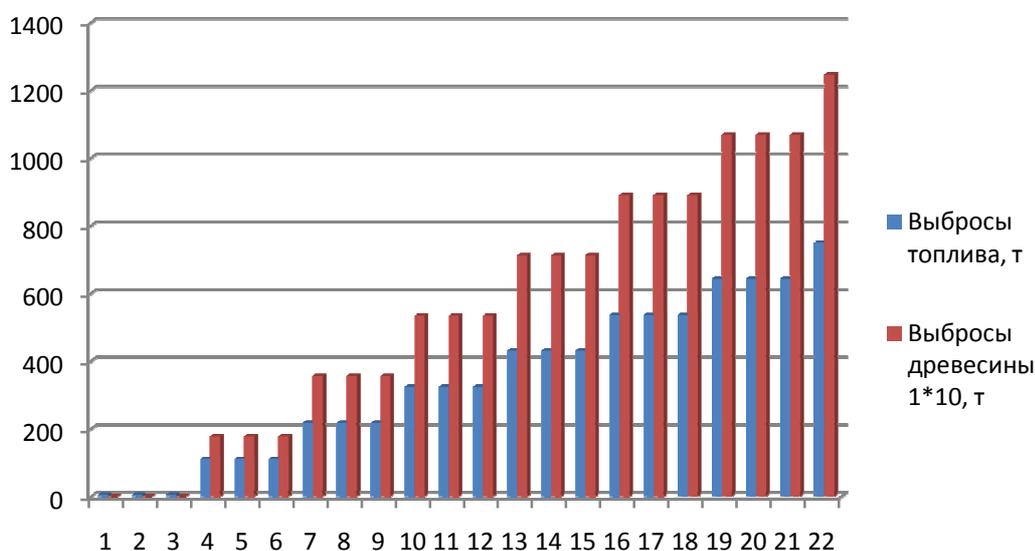


Рис. 3. Выбросы диоксида углерода в жизненном цикле древесины (Расчеты авторов)

В течение первых трех лет после посадки ивы выбросы диоксида углерода были обусловлены сжиганием топлива (дизельное топливо, бензин) в результате работы сельскохозяйственной техники при подготовке участка и посадке ивы. Объемы выбросов составили 5,35 тонны для плантации площадью 30 гектаров. Первая уборка с последующим сжиганием древесины ивы предусмотрена на четвертый год с момента посадки плантации. Топливо сжигалось при уборке древесины комбайном, транспортировке с поля к месту складирования, высушиванию и других операциях. Древесина ивы использовалась для получения тепловой энергии. Уборочный цикл повторялся каждые три года. К окончанию жизненного цикла плантации объем выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании древесины ивы составил 12467 тонн, при использовании топлива согласно необходимым технологическим операциям 749 тонн, а положительный баланс CO<sub>2</sub> составил 11717 тонн. Стоимость квоты одной тонны диоксида углерода на рынке ЕС по торговле выбросами составляет от 20 до 25 евро. Это означает что при условии возможной торговли квотами парниковых газов, можно получить дополнительную прибыль около 3900-7800 евро с каждого гектара плантации ивы. Объем выбросов диоксида углерода при производстве биомассы ивы составляет около 6% от всех выбросов, образующихся при последующем сжигании древесины.

При производстве биотоплива на основе естественных многолетних трав ископаемое топливо используется только на этапе уборки, транспортировки и сушки биомассы. Расчеты показывают, что при получении биомассы многолетних трав выбросы парниковых газов в результате использования ископаемого топлива составляют около 2% от всех выбросов, образующихся при сжигании биотоплива для энергетических целей.

При использовании в качестве биотоплива соломы, парниковые газы будут выбрасываться в атмосферу при всех технологических операциях связанных с использованием ископаемого топлива. Объемы выбросов будут существенно различаться в зависимости от урожайности культуры, характеристики почвы, рельефа местности, влажности при уборке и других факторов, но примерно будут сопоставимы с выбросами при выращивании рапса. Если рассматривать солому как побочный продукт производства зерна, то затраты ископаемого топлива составят 1-1,5% от всех выбросов, образующихся при сжигании биотоплива для энергетических целей. Если же брать в расчет все технологические операции необходимые для выращивания зерновых, то затраты ископаемого топлива составят 15-20%.

*Возможность биологической рекультивации низкоплодородных, деградированных и загрязненных почв.*

Выращивание энергетических культур может оказывать не только отрицательное, но и положительное воздействие на экологические системы, в том числе обеспечивая биологическую рекультивацию (восстановление) деградированных и загрязненных почв. Если рапс, так же как и большинство зерновых культур, для получения хороших урожаев требует плодородной и хорошо окультуренной почвы, естественные многолетние травы и растения ивы могут успешно произрастать на почвах с различными характеристиками. Многолетние травы, выращиваемые на плодородных пахотных землях целесообразно использовать для кормления сельскохозяйственных животных, в то же время биомассу естественных болотных трав, полученную на низкоплодородных деградированных землях можно эффективно использовать для энергетических целей. В наших экспериментах сравнительно высокая урожайность естественных многолетних трав (15 тонн с гектара) была получена на территории выработанных торфяников. Видовой состав травостоя, состоящий из болотных трав (тростник, осока, канареечник), высокая контурность и закустаренность участков не позволяет эффективно использовать биомассу для кормовых целей. Кроме того на таких территориях возникают сложности при выращивании и уборке биомассы. Вышедшие из эксплуатации торфяники образуются после прекращения добычи торфа на энергетические и другие цели. Такие земли малопригодны для выращивания требовательных сельскохозяйственных культур, включая рапс. Для них характерно низкое содержание элементов питания растений, плохая структура и как следствие бедное плодородие. Получение на этих площадях деловой древесины так же является нецелесообразным. Высота деревьев даже спустя 30-40 лет не превышает 10-15 метров и прирост древесины недостаточен для рентабельного производства [28]. Так как в России для добычи торфа используется более 1 млн га, в Республике Беларусь более 200 тыс. га, а площади таких земель как в Беларуси так и в России составляют сотни тысяч гектаров, их рекультивация является серьезной экологической задачей [29]. По результатам наших экспериментов выработанные торфяники можно частично использовать как для получения биомассы многолетних естественных трав, так и короткоцикловых древесных культур, что обеспечит постепенную биологическую рекультивацию таких земель.

Достаточно высокий прирост древесины ивы может быть обеспечен и на других типах деградированных и загрязненных земель [30]. На выработанных и деградированных торфяниках годовой выход древесины составил около 10 тонн с гектара и на загрязненных минеральных почвах более 12 тонн с гектара.

На основании этих результатов можно констатировать, что потенциальные площади только деградированных и загрязненных земель пригодных для короткоцикловых посадок ивы в Беларуси могут составить 180-320 тыс. га. При достигнутой продуктивности, выход древесины с этих площадей составит 2-3 млн. т в расчете на год. В то же время такие земли не могут быть использованы для посевов рапса и зерновых культур и частично могут быть использованы для естественных многолетних трав.

В настоящее время не существует методики, которая позволяла бы рассчитать экологический вред от выращивания сельскохозяйственных культур в денежном выражении. Существуют укрупненные методики

оценки экологического ущерба, ориентированные на выбросы в атмосферный воздух или сбросы сточных вод на территориальном уровне, что позволяет рассчитать денежную стоимость отрицательного воздействия на окружающую среду [31]. При выращивании любой культуры, в том числе энергетической, экономический ущерб будет следствием воздействия на экосистемы химических средств защиты растений, минеральных удобрений, уплотнения почвы при обработках, разрушения плодородного слоя при интенсификации эрозионных процессов и других факторов. Наличие унифицированной методики расчета позволило бы учитывать экономическую эффективность выращивания культур не только на основе рентабельности продажи продукции, но и суммы предотвращенного экономического ущерба. Такой подход позволит более эффективно планировать структуру землепользования, обосновывать оптимальные площади культур, оценивать природно-хозяйственный потенциал региона. При отсутствии такой методики сравнительную экологическую эффективность получения и использования биотоплива на основе энергетических культур можно оценить только по относительным показателям по видам воздействия (табл. 3).

Таблица 3

**Оценка воздействия (эффекта) производства биотоплива на окружающую среду.  
Относительные показатели для данных видов биотоплива\***

Аспект воздействия	Оценка воздействия биотоплива на окружающую среду при выращивании культур			
	Зерновые (солома)	Рапс (семена)	Короткоцикловые (древесина)	Многолетние травы (сено)
Использование пестицидов	--	----	-	0
Использование минеральных удобрений	--	----	-	0
Выбросы CO <sub>2</sub> в процессе жизненного цикла	--	----	-	-
Рекультивация деградированных почв	0	0	+++	+

\*Анализ авторов

- +++ Значительный положительный эффект;
- + Незначительный положительный эффект;
- Значительное отрицательное воздействие;
- Среднее отрицательное воздействие;
- Незначительное отрицательное воздействие;
- 0 – отсутствие воздействия (эффекта)

Наиболее значительное отрицательное воздействие на окружающую среду обусловлено выращиванием растений рапса на семена, главным образом вследствие необходимости внесения высоких доз минеральных удобрений и пестицидов. Несколько ниже оценивается отрицательное воздействие производства соломы как побочного продукта выращивания зерновых культур. Положительный эффект на окружающую среду связан с возможностью выращивания короткоцикловых плантаций ивы и естественных многолетних трав на деградированных, низкоплодородных землях, что обеспечивает их постепенную биологическую рекультивацию.

**Заключение**

Эколого-экономическая оценка производства биотоплива энергетических культур показала, что себестоимость производства биодизеля, выше, чем стоимость дизельного топлива. Среди энергетических культур, биотопливо которых можно использовать для получения тепла, себестоимость энергии полученной из древесины ивы была выше по сравнению с соломой зерновых злаков и биомассой многолетних трав. При планировании посевов энергетических культур целесообразно так же учитывать степень воздействия на окружающую среду при их выращивании и получении энергии из биомассы. В связи с тем, что не существует методики, которая позволяла бы рассчитать экологический вред от выращивания сельскохозяйственных культур в денежном выражении, использовалась оценка сравнительной экологической эффективности производства биотоплива из энергетических культур по ряду показателей. Для многолетних трав выбросы парниковых газов от ископаемого топлива необходимого для производства биотоплива на их основе составляют около 2% по

отношению к выбросам при сжигании полученной возобновляемой биомассы, для древесины ивы – 6%, для зерновых культур при производстве соломы 15–20% и для биодизеля из семян рапса около 25%.

Выращивание рапса для производства биодизеля связано с наиболее значительным воздействием на окружающую среду, что связано с высокой требовательностью культуры к почвенным условиям и агротехнике и необходимостью внесения высоких доз минеральных удобрений и пестицидов. Положительный экологический эффект от выращивания ивы обусловлен возможностью выращивания культуры на деградированных и загрязненных почвах, что способствует их биологической рекультивации.

Результаты исследований могут представлять интерес не только для умеренного климатического пояса России и Беларуси. Плантации короткоциклового древесных культур выращиваются в большинстве европейских стран, в Северной и Южной Америке, Азии. Зерновые культуры, солома которых может использоваться как биотопливо, выращиваются повсеместно, а рынок биотоплива на основе многолетних трав имеет тенденцию к росту. Методы оценки эколого-экономической эффективности производства биотоплива на основе жизненного цикла можно использовать для других энергетических культур, например, сахарного тростника, мискантуса, эвкалипта, конопли и т.д. Учет эколого-экономических аспектов важен для обоснования стратегического потенциала определенного региона к развитию биоэнергетики, для оценки эффективности планируемого строительства биоэнергетических станций, и для анализа направлений и перспектив биологической рекультивации деградированных почв.

### Литература

1. Global energy transformation / International Renewable Energy Agency (IRENA) // IRENA 2018. ISBN 978-92-9260-059-4. 76 p.
2. Энергосбережение и возобновляемые источники энергии: учебно-методическое пособие / О.И. Родькин, О. А. Кучинский, И.И. Матвеев, С.П. Кундас, Н.Н. Вайцехович, С.С. Позняк; под общ. ред. С.П. Кундаса // Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011. - 160 с.
3. The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind / Meadows D. L. [et al.] // New York: Universe Books, 1972. 211 p
4. Mola-Yudego, B. Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast growing plantations / B. Mola-Yudego et al // BIOFUELS, 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/17597269.2016.1271627>, - 11 p.
5. WBA global bioenergy statistics 2017 // World bioenergy association, 4th edition - WBA Global Bioenergy Statistics. 80 p.
6. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития / Л.С. Орси́к [и др.]. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Росинформагротех, 2008. 98 с.
7. Evaluation of the Comparative Energy, Global Warming and Socio-Economic Costs and Benefit of Biodiesel / N.D. Mortimer [et al] Report. – U.K. / Sheffield Hallam University, 2003. 119 p.
8. Environmental performances of giant reed (*Arundodonax L.*)cultivated in fertile and marginal lands: A case study in the Mediterranean // S. Bosco, N. Nassi, D. Nasso, N. Roncucci, M. Mazzoncini, E. Bonari //Europ. J. Agronomy 78 (2016), - P. 20–31
9. Common reed for thatching - A first review of the European market // Sabine Wichmann, Jan Felix Köbbing // Industrial Crops and Products 77 (2015), - P. 1063 – 1073
10. Use of biomass from wet peatland for energy purpose / S.Kundas, W. Wichtman, A. Rodzkin, V. Pashinsky // International and renewable energy sources as alternative primary energy sources in the region: 8 International Scientific Conference, 2-3 April 2015 Lviv, - 2015.-P. 77-81.
11. Штукин С. Как создавать и выращивать энергетические плантации // Лесное и охотничье хозяйство. 2004. № 3. С. 14–17.
12. Labrecque M. High biomass yield achieved by *Salix* clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada // Biomass & Bioenergy. 2003. Vol. 25(2). P. 135–146.
13. Schweier J. Harvesting of short rotation coppice – harvesting trials with a cut and storage system in Germany // Silva Fennica. 2012. No 46(2). P. 287–299.
14. Stern B.W. Stroh als Quelleerneuerbarer Energie // Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 15/1. 2010. P. 95–103.
15. Biomass Production in Energy Forests. p. 196-202 / J. Mosiej, A. Karczmarczyk, K. Wyporska, A. Rodzkin // Ecosystem Health and Sustainable Agriculture 3. Editors: Lars Rydén and Ingrid Karlsson. The Baltic University Programme, Uppsala University, 2012. P. 196–201.
16. Mola-Yudego B. Regional potential yields of short rotation willow plantations on agricultural land in Northern Europe // Silva Fennica. 2010. № 44(1). P. 63–76.
17. Sleight, Nathan J. Recently bred willow (*Salix* spp.). Biomass crops show stable yield trends over three rotations at two sites // Bioenerg. Res. 2016. No 9(3). P. 782–797.
18. Evald A. Biomass for energy - Danish Solutions // Copenhagen: Danish Energy Agency. 1996. 38 p.
19. Straw for energy production. Technology-Environment-Economy / The center for biomass technology. 1998. 53 p.

20. Rodzkin A. Life cycle assessment of biomass production from drained wetlands areas for composite briquettes fabrication // *Energy Procedia*. 2017(128). P. 261–267.
21. Родькин О.И. Сельскохозяйственная экология: учеб.-метод. пос. / О. И. Родькин, Т. М. Дайнеко, Л. А. Веремейчик. – Минск: БАТУ, 2001. 191 с.
22. Родькин О.И. Опыт создания искусственных короткоцикловых плантаций ивы на выработанных торфяниках // *Сибирский лесной журнал*. 2018. № 3. С. 83–92.
23. Бамбалов Н.Н. Современное состояние и перспективы использования торфяного фонда Беларуси // *Природные ресурсы*, 2000. №3. С. 5–15.
24. Родькин О.И. Производство возобновляемого биотоплива в аграрных ландшафтах: экологические и технологические аспекты: монография / О. И. Родькин. - Минск: МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011. - 212 с.
25. Данилов-Данильян В.И. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. –М.: Гос. ком. РФ по охране окружающей среды. 1999. 41 с.

### References

1. Global energy transformation / International Renewable Energy Agency (IRENA) // IRENA 2018. ISBN 978-92-9260-059-4. 76 p.
2. EHnergosberezhenie i vozobnovlyaemye istochniki ehnergii: uchebno-metodicheskoe posobie / O.I. Rod'kin, O. A. Kuchinskij, I.I. Matveenکو, S.P. Kundas, N.N. Vajcekhovich, S.S. Poznyak; pod obshch. red. S.P. Kundasa // Minsk: MGEHU im. A.D. Saharova, 2011. 160 p.
3. The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind / Meadows D. L. [et al.] // New York: Universe Books, 1972. 211 p
4. Mola-Yudego, B. Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast growing plantations / B. Mola-Yudego et al // *BIOFUELS*, 2017, <http://dx.doi.org/10.1080/17597269.2016.1271627>, - 11 p.
5. WBA global bioenergy statistics 2017 // World bioenergy association, 4th edition - WBA Global Bioenergy Statistics. 80 p.
6. Bioehnergetika: mirovoj opyt i prognozy razvitiya / L.S. Orsik [i dr.]. - 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Rosinformagrotekh, 2008. 98 p.
7. Evaluation of the Comparative Energy, Global Warming and Socio-Economic Costs and Benefit of Biodiesel / N.D. Mortimer [et al] Report. – U.K. / Sheffield Hallam University, 2003. 119 p.
8. Environmental performances of giant reed (*Arundodonax L.*)cultivated in fertile and marginal lands: A case study in the Mediterranean // S. Bosco, N. Nassi, D. Nasso, N. Roncucci, M. Mazzoncini, E. Bonari // *Europ. J. Agronomy* 78 (2016). P. 20–31
9. Common reed for thatching - A first review of the European market // Sabine Wichmann, Jan Felix Köbbing // *Industrial Crops and Products*. 2015. № 77. P. 1063 – 1073
10. Use of biomass from wet peatland for energy purpose / S.Kundas, W. Wichtman, A. Rodzkin, V. Pashinsky // International and renewable energy sources as alternative primary energy sources in the region: 8 International Scientific Conference, 2-3 April 2015 Lviv, - 2015.-P. 77-81.
11. SHtukin S. Kak sozdavat' i vyrashchivat' ehnergeticheskie plantacii // *Lesnoe i ohotnich'e hozyajstvo*. 2004. № 3. P. 14–17.
12. Labrecque M. High biomass yield achieved by *Salix* clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada // *Biomass & Bioenergy*. 2003. Vol. 25(2). P. 135–146.
13. Schweier J. Harvesting of short rotation coppice – harvesting trials with a cut and storage system in Germany // *Silva Fennica*. 2012. No 46(2). P. 287–299.
14. Stern B.W. Stroh als Quelleerneuerbarer Energie // *Swiss Bull. angew. Geol*. Vol. 15/1. 2010. P. 95–103.
15. Biomass Production in Energy Forests. p. 196-202 / J. Mosiej, A. Karczmarczyk, K. Wyporska, A. Rodzkin // *Ecosystem Health and Sustainable Agriculture* 3. Editors: Lars Rydén and Ingrid Karlsson. The Baltic University Programme, Uppsala University, 2012. P. 196–201.
16. Mola-Yudego B. Regional potential yields of short rotation willow plantations on agricultural land in Northern Europe // *Silva Fennica*. 2010. 44(1). P. 63–76.
17. Sleight, Nathan J. Recently bred willow (*Salix* spp.). Biomass crops show stable yield trends over three rotations at two sites // *Bioenerg. Res*. 2016. No 9(3). P. 782–797.
18. Evald A. Biomass for energy - Danish Solutions // *Copenhagen: Danish Energy Agency*. 1996. 38 p.
19. Straw for energy production. Technology-Environment-Economy / The center for biomass technology. 1998. 53 p.
20. Rodzkin A. Life cycle assessment of biomass production from drained wetlands areas for composite briquettes fabrication // *Energy Procedia*. 2017(128). P. 261–267.
21. Rod'kin O.I. Sel'skohozyajstvennaya ehkologiya: ucheb.-metod. pos. / O. I. Rod'kin, T. M. Dajneko, L. A. Veremeychik. – Минск: БАТУ, 2001. 191 p.

22. Rod'kin O.I. Opyt sozdaniya iskusstvennyh korotkociklovyh plantacij ivy na vyrabotannyh torfyanikah // *Sibirskij lesnoj zhurnal*. 2018. № 3. P. 83–92.
23. Bambalov N.N. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya torfyanogo fonda Belarusi // *Prirodnye resursy*. 2000. № 3. P. 5–15.
24. Rod'kin O.I. Proizvodstvo vozobnovlyаемого biotopliva v agrarnykh landshaftah: ehkologicheskie i tekhnologicheskie aspekty: monografiya / O. I. Rod'kin. -Minsk: MGEHU im. A.D. Saharova, 2011. 212 p.
25. Danilov-Danil'yan V.I. Vremennaya metodika opredeleniya predotvrashchennogo ehkologicheskogo ushcherba. – M.: Gos. kom. RF po ohrane okruzhayushchej sredy. 1999. 41 p.

*Статья поступила в редакцию 06.02.2019 г.*