

## ОЦЕНКА БАЛАНСА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ БИОМАССЫ С КОРОТКОЦИКЛОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАНТАЦИЙ ИВЫ

### Содержание

В статье приведено количественный анализ выбросов парниковых газов в технологии производства биомассы на примере короткоцикловых древесных плантаций ивы. Основной объем выбросов связан с уборкой плантации ивы. В статье показано структуру потребления топлива и выбросов диоксида углерода согласно технологическим операциям. Обосновано замену ископаемого топлива на древесину ивы как экологическое и экономическое направление.

**Ключевые слова:** выбросы парниковых газов, биоэнергия, биомасса, технологии производства ивы, структура газовых выбросов

## THE ASSESSMENT OF GREENHOUSE GASES FOR BIOMASS PRODUCTION FROM SHORT ROTATION COPPICE ENERGY WILLOW PLANTATIONS

### Summary

Greenhouse gas control is a key aspect for climate protection. The positioning of corporations concerning greenhouse gas emissions (GHG) has changed profoundly in the past two decades. As climate regulation became inevitable, companies started adopting more proactive strategies. One of the effective methods for greenhouse gas emission calculation is based on life cycle analysis. A carbon footprint is defined as the sum of greenhouse gas (GHG) emissions caused by an organization, event, or product and is expressed in terms of CO<sub>2</sub> equivalents (CO<sub>2</sub>-e). Our investigations were devoted to greenhouse emission assessment during life cycle of willow wood production from short rotation coppice plantations. In accordance with results about 48% of carbon dioxide gas from all life cycle of willow was emitted during wood harvesting and transportation to energy plants. It is necessary to optimize the logistic scheme of willow wood harvesting and transportation for decreasing of greenhouse gas emission. The substitutions of fossil fuel by willow wood enable to save 11733 ton CO<sub>2</sub>-e from 30 hectares of willow plantation. The carbon tax for instance in Australia starting at AU\$ 23 a ton of Carbon Dioxide equivalent (tCO<sub>2</sub>e). Thus, the substitute of fossil fuel by willow wood may have profit as for regional so and for local level of production.

**Key words:** greenhouse gas emissions, bioenergy, short rotation coppice, willow

### 1. Введение

Предотвращение глобального изменения климата является одной из ключевых задач современного общества. На конференции ООН по окружающей среде и развитию 1992 года в Рио-де-Жанейро была принята Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК), в которой обозначены основные направления по решению данной проблемы [1]. Следующим шагом стало подписание (1997 г.) и вступление в силу (2005 г.) Киотского протокола (КП) к РКИК как инструмента ее практической реализации, содержащего систему обязательств, контроля за их соблюдением и рыночных механизмов регулирования – международной торговли квотами на выбросы и сокращениями выбросов парниковых газов (ПГ) [2].

Самым важным моментом Киотского протокола является наличие гибкости в отношении достижения поставленных ограничений на выбросы парниковых газов – механизмы Киотского протокола (торговля квотами, совместного осуществления, чистого развития). В основе данной системы лежит принцип «пузыря», использованный в США при регулировании выбросов диоксида серы [3]. В соответствии с Директивой Европейского Парламента и совета 2003/87/ЕС, в

государствах-членах ЕС с 1 января 2005 года началась торговля квотами на выбросы парниковых газов. Согласно потребностям государства снизить выбросы парниковых газов оператору в определенном регионе передается количество квот, которое операторы могут выбрасывать в атмосферу. Если оператор выбрасывает в атмосферу меньше установленной квоты, то разницу между установленной квотой и действительным выбросом он может продать [4]. Для прогноза выбросов парниковых газов использовано регрессионное моделирование зависимости выбросов парниковых газов от потребления первичных топливно-энергетических ресурсов и экономического развития секторов [5].

В настоящее время все больше производителей добровольно присоединяются к так называемому «углеродному клубу» (“carbon clubs”) целью которого является снижение выбросов парниковых газов [6]. Такая тенденция объясняется рядом причин. Если в начале 90-х годов корпорации стремились блокировать регулирование связанной с изменением климата, то с момента признания такого регулирования в ряде международных документов они стремятся разрабатывать адаптивную стратегию. Так как такая стратегия была принята без связи с введением квот на сокращение выбросов, она получила название

«Добровольные экологические инициативы». Кампании увидели новые перспективы для рынка, улучшения репутации и развития производства в связи с вопросами регулирования климата. В таких условиях важнейшим вопросом становится определение количества выбросов парниковых газов применительно к производству того или иного вида продукции. В настоящее время одним из актуальных вопросов для бизнеса в области углеродной стратегии является неопределенность национальной политики в сфере регулирования выбросов парниковых газов. Исследования по оценке эффективности применения «углеродной стратегии» для компаний, действующих в различных сегментах энергетического рынка, были проведены в Австралии [7]. Результаты показали, что любая кампания может получить определенные дивиденды при следовании «углеродной стратегии». Но оптимальные условия для ее реализации на уровне компании зависят от конкретных факторов, в том числе вопросов национальной политики. В Австралии Clean Energy Legislative Package или углеродный налог был введен 1 июля 2012 года. Первоначальная ставка составила 23 австралийских доллара за тонну-эквивалент диоксида углерода. Но после трех лет ставка должна быть пересмотрена в большую сторону [8].

Одним из эффективных методов является расчет так называемого «углеродного следа», (*“carbon footprint”*), основанный на оценке жизненного цикла продукции.

Такой подход используют кампании различных видов деятельности: промышленные, энергетические, сельскохозяйственные.

Так, проводились исследования по оценке выбросов парниковых газов при производстве и использовании электромобилей. Полученные результаты станут основой для дальнейшего развития данной отрасли в Турции [9]. Одним из секторов сельскохозяйственного производства который обуславливает значительный объем выбросов парниковых газов, является производство говядины. Целью исследований выполненных в Бразилии был расчет «углеродного следа» на один килограмм живого веса. При этом учитывались различные методы получения продукции [10]. Необходимость оценки выбросов парниковых газов при производстве сельскохозяйственной продукции и разработки новых подходов, направленных на снижение выбросов отмечается и в ряде других публикаций [11, 12, 13].

Выбросы парниковых газов, полученные при использовании возобновляемых источников энергии, не учитываются при расчете квот. Тем не менее, следует учитывать те парниковые газы, которые выбрасываются на протяжении жизненного цикла получения энергетического ресурса. В связи с этим методы «углеродного следа» получили активное распространение при оценке эффективности использования возобновляемых источников энергии. Крупные ГЭС это основной источник производства электрической энергии на возобновляемой основе в настоящее время. Метод анализа жизненного цикла и расчета «углеродного отпечатка» является наиболее эффективным для оценки потенциального снижения выбросов парниковых газов при строительстве и функционировании гидроэлектростанций [14].

Исследования показали, что низко-углеродный статус крупных ГЭС в настоящее время несколько

переоценен, и необходимо внести определенные коррективы для исправления ситуации в будущем.

Одним из наиболее перспективных источников для получения тепловой энергии является биомасса. Для получения биомассы, так же необходимо затратить определенное количество ископаемого топлива, что предполагает выброс парниковых газов. Метод ОЖЦ использован в ряде исследований связанных с различными источниками биомассы для получения энергии, например водорослей [15]. Методология исследований была построена на стандарте ОЖЦ ИСО 14044 «Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации». Проведенная оценка позволила определить точки риска при производстве энергии из водорослей.

Эти и другие исследования показали, что необходим поиск новых подходов и технологий, позволяющих снизить количество парниковых газов при получении биомассы [16].

Одним из перспективных направлений является получение энергии из биомассы короткоцикловых древесных плантаций: ивы, тополя, эвкалипта и др. Изучение потенциала быстрорастущих подвидов и гибридов ивы, тополя, осины, мискантуса и других растений сегодня активно проводится в ряде стран (Швеция, Финляндия, США, Канада, Польша, и др.) [17, 18, 19, 20, 21, 22]. В этой связи особый интерес вызывает ива, как растение способное произрастать в условиях повышенной увлажненности, на разных типах почв характеризующихся различным уровнем плодородия. Среднегодовой урожай при четырехлетней ротации ивы в соответствии с результатами, полученными в ряде зарубежных стран, может достигать до 10-15 т условной сухой древесины с га (Швеция, США, Канада, Польша). Однократно заложенная плантация может быть использована для получения 3-4 урожаев продукции без значительного снижения продуктивности. Потенциальные площади для посадок быстрорастущих древесных насаждений например, в Беларуси могут составить до 200-300 тыс. га. В масштабах страны это позволит получить около 2-3 млн. т сухой древесины, что составляет 0,7-1 млн. т.у.т.

Природные условия центральной и восточной Европы позволяют рассматривать иву как перспективную культуру для создания коммерческих энергетических плантаций. В соответствии с решениями Киотского протокола, выбросы парниковых газов, образующиеся в результате сжигания древесины энергетических культур, так же как и других источников биомассы, которая производится на возобновляемой основе и используется для производства энергии, не принимаются в расчет при установлении углеродных квот. Вместе с тем, на протяжении жизненного цикла производства биотоплива из древесины ивы, используется определенное количество ископаемой энергии. Дизельное топливо и бензин потребляется в процессе закладки и эксплуатации плантации, транспортировки и измельчения биомассы. Таким образом, количество парниковых газов, которое выбрасывается в окружающую среду при условии замещения ископаемого топлива на древесину, нельзя рассматривать как полностью экономленную углеродную квоту. Из этого количества необходимо вычесть выбросы, связанные с использованием ископа-

емого топлива. Целью наших исследований была оценка выбросов парниковых газов в процессе выращивания ивы на энергетических плантациях. Полученные результаты позволят оценить реальное уменьшение количества парниковых газов при использовании древесины ивы в качестве биотоплива по сравнению с традиционными энергоносителями.

## 2. Методика проведения исследований

Плантации быстрорастущей ивы были заложены в экологических условиях Республики Беларусь. По результатам исследований проведенных в различных агроклиматических зонах нашей страны (Гродненская, Могилевская, Минская и Брестская области) урожайность ивы в Беларуси составила от 9 до 12 тонн сухой древесины в пересчете на год, что соответствует показателям, достигнутому в США или Швеции. Разработана адаптивная к условиям Беларуси технология возделывания ивы, в том числе на выработанных торфяниках и деградированных торфяных почвах, которая легла в основу для расчета выбросов парниковых газов при получении древесины [23].

Изучение морфологических параметров растений ивы, для оценки динамики их роста и развития в полевых условиях проводилось согласно принятым методикам [24]. Урожайность ивы определялась взвешиванием при сплошной уборке по делянкам. Результаты измерений морфологических параметров и урожайности ивы с каждой делянки, обрабатывались методом дисперсионного анализа. Содержание влаги в древесине ивы и удельная теплота сгорания определялись в лабораторных условиях. Выбросы парниковых газов определялись согласно принятым международным и национальным методикам [25, 26].

## 3. Результаты исследований и их обсуждение

Эксперименты по изучению технологических аспектов выращивания ивы в короткоцикловых посадках проводились в Могилевской, Минской, Гродненской и Брестской области: на выработанных и деградированных торфяниках, суглинистых и песчаных почвах, связных супесчаных почвах. Проведенные исследования позволили разработать и предложить технологические приемы возделывания ивы адаптивные к почвенно-климатическим условиям нашей страны.

Урожай биомассы с энергетических плантаций ивы, как правило, убирается с интервалом раз в три года, при этом без значительного снижения продуктивности культуры может быть получено не менее 7 урожаев после отрастания биомассы [27]. Такой подход подтверждается как теоретическими исследованиями, основанными на генетических особенностях культуры, так и практическими результатами. Таким образом, срок эксплуатации коммерческих плантаций ивы составляет более 20 лет, что в значительной степени снижает себестоимость единицы энергии полученной из биомассы.

Таким образом уборка древесины проводится один раз в три или четыре года, в зависимости от принятой технологии и площади, занятые под плантации, исключаются из севооборота на 20–25 лет (средний срок эксплуатации однократно заложённой плантации).

При трехлетнем цикле производства древесины в наших экспериментах на лучших участках были получены следующие результаты:

- Выработанные торфяники: 9,9 тонны древесины с гектара в пересчете один год и на 10-процентную влажность.
- Суглинистые дерново-подзолистые почвы: 12,5 тонн древесины с гектара в пересчете один год и на 10-процентную влажность.
- Деградированные торфяно-болотные почвы: 10,9 тонн древесины с гектара в пересчете один год и на 10-процентную влажность.

По результатам экспериментов была разработана технология возделывания ивы адаптивная к конкретным почвенно-климатическим условиям. Технология легла в основу разработки технологических карт возделывания культуры, которые в свою очередь использованы для выполнения экономических расчетов (таблица 1).

Технологическая карта включает ряд основных блоков:

- Подготовка участка (обработка почвы);
- Посадка черенков ивы;
- Уход за посадками;
- Уборка древесины;
- Транспортировка;
- Перепахка участка.

При выращивании ивы выбросы парниковых газов связаны с использованием дизельного топлива для выполнения технологических операций.

При сжигании дизельного топлива основным парниковым газом, который выбрасывается в атмосферу, является диоксид углерода. Структура потребления топлива и выбросов диоксида углерода согласно технологическим операциям представлена на рисунке 1.

Как следует из представленных данных, основной объем выбросов связан с уборкой плантации ивы. В этот блок так же входит транспортировка древесины потребителю (теплоэлектростанции).

Уборка является наиболее затратной операцией с точки зрения потребления топлива и соответственно выбросов парниковых газов и для других культур, например при выращивании сои [29]. По результатам оценки проведенной для 55 фермерских хозяйств, на протяжении 3 лет выбросы парниковых газов по технологическим операциям распределились следующим образом: уборка и переработка остатков – 36%, применение удобрений – 16%, известкование – 13%, использование пестицидов – 7% и т.д.

При выращивании ивы более значительные затраты на уборку связаны с относительно высокой урожайностью культуры. Значительное влияние на выбросы парниковых газов технологических операций связанных с уборкой короткоцикловых культур отмечено и в других публикациях [30, 31, 32]. В то же время подчеркивается, что необходимо уделять особое внимание такой технологической операции как борьба с сорняками (G. Verhongeray, R. Ceulemans). В частности именно от этого аспекта в значительной степени зависит баланс углерода в почве. В наших исследованиях оценка выбросов связанных с почвенным углеродом при возделывании ивы на короткоцикловых плантациях не проводилась. Средняя теплота сгорания древесины ивы устано-вляемая в наших экспериментах

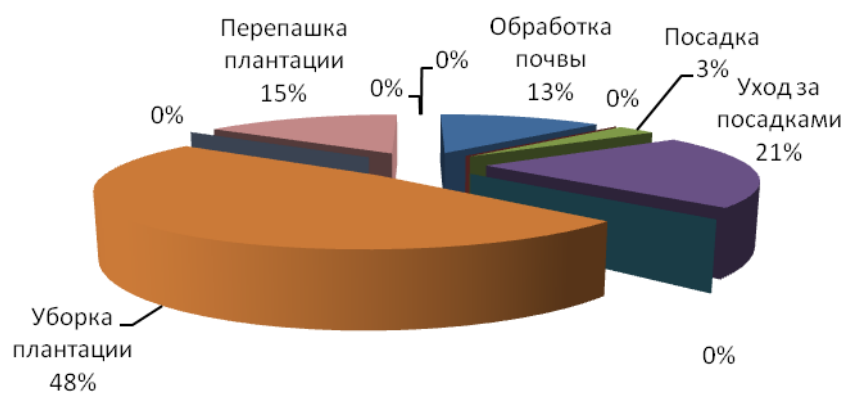
составила - 18500 Дж·кг<sup>-1</sup>. Это значит, что в пересчете на год с одного гектара плантации можно получить 4,4 тонны условного топлива, что эквивалентно примерно 3,9 тысячам м<sup>3</sup> природного газа и 3,2 тонны топочного мазута. На рисунке 2 представлены расчётные данные по выбросам CO<sub>2</sub> при использовании древесины ивы в качестве биотоплива. Данные по выбросам парниковых газов рассчитаны на основе интерактивной модели разработанной для эколого-экономической оценки

производства биомассы ивы на энергетических плантациях [33, 34]. Количество выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании древесины ивы на энергетические цели составит 12467 тонн. За весь срок эксплуатации (в расчете на площадь плантации в 30 гектаров), выбросы, связанные с потреблением дизельного топлива суммарно составят 734 тонны. При замене природного газа на эквивалентное по выходу энергии количество древесины ивы положительный баланс CO<sub>2</sub> составит 11733 тонн.

Таблица 1. Технологическая карта получения древесины ивы. Площадь 1 га  
Table 1. Technological scheme of willow wood obtaining. Area 1 ha

Технологическая операция	Расход топлива, л	% от общего количества
<i>Обработка почвы</i>	57,4	12,67
Лушение стерни (6-8) см	8,6	1,90
Приготовление рабочего раствора гербицида	0,9	0,20
Транспортировка воды в поле и заправка опрыскивателя	1,8	0,40
Внесение гербицидов	3,6	0,79
Погрузка в транспортное средство минеральных удобрений	0,2	0,04
Транспортировка и внесение фосфорных и калийных удобрений	3,6	0,00
Зяблевая вспашка	18,8	0,79
Погрузка в транспортное средство минеральных азотных удобрений	0,1	4,15
Культивация с боронованием	5,3	0,02
Транспортировка и внесение азотных удобрений	3,6	1,17
Рыхление с выравниванием почвы	10,9	0,79
		2,41
<i>Посадка</i>	13,4	2,96
Предпосадочная нарезка гребней	5,9	1,30
Посадка черенков	7,5	1,65
<i>Уход за посадками (7 циклов)</i>	96,6	21,32
Погрузка в транспортное средство минеральных удобрений	1,4	0,31
Транспортировка и внесение фосфорных и калийных удобрений	25,2	5,56
Погрузка в транспортное средство азотных удобрений	0,7	0,15
Транспортировка и внесение азотных удобрений	25,2	5,56
Внесение гербицидов	44,1	9,73
<i>Уборка плантации (7 циклов)</i>	217	47,88
Уборка древесины с погрузкой и измельчением	133	29,35
Транспортировка древесины	84	18,53
<i>Перепахка плантации</i>	68,8	15,18
Раскорчевка участка	50	11,03
Перепахка участка	18,8	4,15
<i>Итого</i>	<b>453,2</b>	<b>100</b>

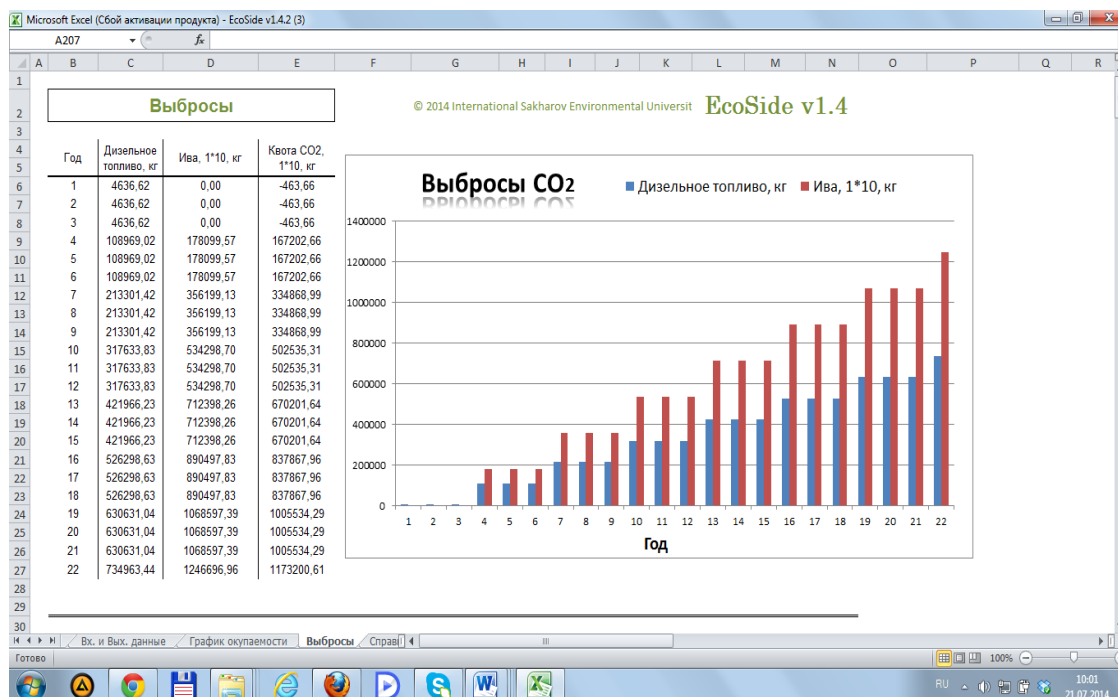
Источник: собственная разработка / Source: own work



Источник: собственная разработка / Source: own work

Рисунок 1. Структура выбросов диоксида углерода при получении биомассы ивы согласно технологическим операциям

Fig. 1. Structure of carbon dioxide emissions when obtaining biomass willows according to technological operations



Источник: собственная разработка / Source: own work

Рисунок 2. Динамика выбросов двуокиси углерода при использовании технологии уборки древесины ивы с сушкой биомассы. Площадь плантации 30 га

Fig. 2. Dynamics of the carbon dioxide emissions of wood harvesting technology of willow biomass dryer. Area 30 hectares of plantations

В соответствии с обязательствами Республики Беларусь по рамочной конвенции ООН об изменении климата и при сложившемся рынке в Системе европейского союза по торговле выбросами (EU ETS), стоимость одной тонны диоксида углерода может составлять около 15 евро [8].

Таким образом, замещение ископаемого топлива древесиной ивы в качестве энергоносителя потенциально позволит получить около 4000 евро с каждого гектара плантации ивы за весь срок ее эксплуатации, в случае реализации механизма торговли углеродными квотами на локальном уровне. Безусловно, такой подход послужит дополнительным стимулом для производителей древесины на энергетические цели с короткоцикловых плантаций.

#### 4. Заключение

Получение любого вида энергии на возобновляемой основе топлива связано с использованием ископаемого топлива (дизель, бензин, природный газ и т.д.). Одним из эффективных методов позволяющих оценить выбросы парниковых газов в процессе получения продукции является метод ОЖЦ (оценки жизненного цикла). Наши исследования, доказывают эффективность такого подхода для оценки выбросов парниковых газов при получении древесины на энергетические цели с короткоцикловых посадок ивы. Основной объем выбросов связан с использованием дизельного топлива при возделывании плантации. Расчеты, выполненные с учетом оптимального планируемого срока эксплуатации плантации (22 года от момента посадки) показали, что основной объем выбросов диоксида углерода (48%) связан с такой технологической операцией как уборка и транспортировка древесины. Снизить объемы выбросов возможно при

оптимизации логистики этих технологических операций. В частности организация движения уборочной техники, оптимизация схем уборки, погрузки и транспортировки и т.д. Немаловажное значение имеет расстояние от плантации ивы до потребителя (теплоэлектростанции). С одного гектара ивы с учетом ее урожайности и удельной теплоты сгорания можно получить 4,4 тонны условного топлива, что эквивалентно примерно 3,9 тысячам м<sup>3</sup> природного газа и 3,2 тонны топочного мазута. Количество выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании древесины ивы на энергетические цели составит 12467 тонн. За весь срок эксплуатации (в расчете на площадь плантации в 30 гектаров), выбросы, связанные с потреблением дизельного топлива суммарно составят 734 тонны. При замене природного газа на эквивалентное по выходу энергии количество древесины ивы положительный баланс CO<sub>2</sub> составит 11733 тонн. Стоимость квоты на выбросы одной тонны эквивалента CO<sub>2</sub> в настоящее время на международном рынке составляет около 15 евро. Замена ископаемого топлива на древесину ивы, таким образом, является как экологически, так и экономически обоснованным направлением, как на уровне стран, так и отдельных производителей энергии. Реализация такого подхода на локальном уровне послужит дополнительным стимулом для производителей древесины на энергетические цели с короткоцикловых плантаций.

#### 5. Литература

- [1] United nations framework convention on climate change / United nations 1992, p. 25.
- [2] Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change, United nations 1998, p. 22.
- [3] Энергоэффективность и торговля квотами на выбросы. // Секретариат энергетической хартии. – ПЭЭСЭА, 2006.

- [4] Directive 2003/87/EC of the European parliament and of the council of 13 October 2003 / Official Journal № 1 338, 2004.
- [5] The Energy and Power Evaluation Program (ENPEP). Model Overview and Summary of Recent Applications / Argonne National Laboratory. – Chicago, Illinois: USA, 2003.
- [6] Why join a carbon club? A study of the banks participating in the Brazilian “Business for Climate Platform”/ Renato J. Orsato, José Guilherme F. de Campos, Simone R. Barakat, Mariana Nicolletti, Mario Monzoni // *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96, 387-396.
- [7] Carbon strategies and management practices in an uncertain carbonomic environment - lessons learned from the coal-face / Dina Wahyuni, Janek Ratnatung // *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96, 397-406.
- [8] Integration of carbon risks and opportunities in enterprise risk management systems: evidence from Australian firms /Nava Subramaniam, Dina Wahyuni, Barry J. Cooper, Philomena Leung, Graeme Wines // *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96, 407-417.
- [9] Assessment of electrically-driven vehicles in terms of emission impacts and energy requirements: a case study for Istanbul, Turkey / Bunyamin Yagcitek, Mehmet Uzunoglu, Arif Karakas, Ozan Erdinc // *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96, 486-492.
- [10] Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study /Clandio F. Ruviaro, Cristiane Maria de Léis, Vinícius do N. Lampert, Júlio Otávio Jardim Barcellos, Homero Dewes // *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96, 435-443.
- [11] Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S.A.* 108, 20260-20264.
- [12] Hertwich, E.G., Peters, G.P., 2009. Carbon footprint of Nations: a global, Trade-Linked analysis // *Environ. Sci. Technol.* 43, 64140-6420.
- [13] Ruviaro, C.F., Gianezini, M., Brandao, F.S., Winck, C.A., Dewes, H., 2012. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends // *J. Clean. Prod.* 28, 9-24.
- [14] Embodied carbon budget accounting system for calculating carbonfootprint of large hydropower project // Jin Zhang, Linyu Xu // *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96, 444-451.
- [15] Energy production from microalgae biomass: carbon footprint and energy balance / Diego Lima Medeiros, Emerson A. Sales, Asher Kiperstok // *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96, 493-500.
- [16] Dovi, V.G., Friedler, F., Huisingh, D., Klemes, J.J., 2009. Cleaner energy for sustainable future. *J. Clean. Prod.* 17 (10), 889e895. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.02.001>.
- [17] Dimitriou, J. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. / J. Dimitriou, P. Aronsson, // *Unasylva*, 2005, 6, 47–50.
- [18] Rytunen, V-M. Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. / V-M. Rytunen, // *Biomass and Bioenergy*, 1999, 16, 103–117.
- [19] Schweier, J. Harvesting of short rotation coppice – harvesting trials with a cut and storage system in Germany / J.Schweier, G.Becker // *Silva Fennica*, 2012, 46(2), 287–299.
- [20] Stern, B. W.: Stroh als Quelle erneuerbarer Energie, *Swiss Bull. angew. Geol.* Vol. 15/1, 2010. – P. 95 – 103.
- [21] Willow Biomass Producer’s Handbook / L. P. Abrahamson [et al.]. – State University of New York. – 2002, - 32 p.
- [22] 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, - 325 p.
- [23] 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.
- [24] Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М. : Колос, 1985. - 416 с.
- [25] Global Warming Potentials. Climate Change 1995, The Science of Climate Change: Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report // [http://unfccc.int/ghg\\_data/items/3825.php](http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php).
- [26] Технический кодекс установившейся практики. ТКП 17.09-01-2011 (02120) // Миприроды, Минск, с. 27.
- [27] Sleight, Nathan J. Recently bred willow (*Salix* spp.). Biomass crops show stable yield trends over three rotations at two sites / Nathan J. Sleight, Timothy A. Volk // *Bioenerg. Res.*, 9(3), New-York, 2016., P. 782-797.
- [28] Sleight, Nathan J. Recently bred willow (*Salix* spp.). Biomass crops show stable yield trends over three rotations at two sites / Nathan J. Sleight, Timothy A. Volk // *Bioenerg. Res.* 9(3), New-York, 2016., P. 782-797.
- [29] Greenhouse gas assessment of Brazilian soybean production: a case study of Mato Grosso State / Guilherme Silva Raucá, Cindy Silva Moreira, Priscila Aparecida Alves, Francisco F.C. Mello, Leidivan de Almeida Frazão, Carlos Eduardo P. Cerri, Carlos Clemente Cerri // *Journal of Cleaner Production*, 2015, 96, 418-425.
- [30] Neglected carbon pools and fluxes in the soil balance of short-rotation woody biomass crops / G. Berhongaray, R. Ceulemans // *biomass and bioenergy* 2015, 73, 62-66.
- [31] Hillier J, Whittaker C, Dailey G, Aylott M, Casella E, Richter GM, et al. Greenhouse gas emissions from four bioenergy crops in England and Wales: integrating spatial estimates of yield and soil carbon balance in life cycle analyses // *GCB Bioenergy* 2009, Volume 1, Issue 4 August 2009, 267–281.
- [32] Njakou Djomo S, El Kasmoui O, Ceulemans R. Energy and greenhouse gas balance of bioenergy production from poplar and willow: a review. *GCB Bioenergy*, 2011, 3, 181.
- [33] Родькин, О.И. Планирование производства биотоплива из древесины быстрорастущей ивы на основе интерактивной модели / О.И. Родькин, В.А. Иванюкович, А.А. Шабанов // *Вестник Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта*. – 2014. - № 2(80). - С. 39-44.
- [34] Ecological and economic importance of energy crops / Aleh Rodzkin, Sasa Orlovich, Andrej Pilipovich, Borivoj Krstich // *Proceedings of International eco-conference. “Environmental protection of urban and suburban settlements” / Novi Sad, Serbia, 25–28 September 2013, - Novi Sad, 2013, 501–509.*