

УДК 574:576:332:621.311

Планирование производства биотоплива из древесины быстрорастущей ивы на основе интерактивной модели

О.И. Родькин, В.А. Иванюкович, А.А. Шабанов

Учреждение образования «Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова»

В статье представлена интерактивная модель, разработанная на основе технологической карты возделывания быстрорастущей ивы и предназначенная для планирования производства биотоплива в конкретных хозяйственных условиях.

Цель исследования – выполнение оценки эколого-экономической эффективности производства древесины быстрорастущей ивы в качестве возобновляемого биотоплива на региональном уровне, рассчитывание баланса парниковых газов при получении и использовании биомассы на основе интерактивной модели.

Материал и методы. Полевые эксперименты по возделыванию быстрорастущей ивы проводились в Могилевской, Гродненской, Брестской и Минской областях на различных типах почв. Получены данные по влиянию экологических факторов на динамику роста, развития и продуктивность ивы. По результатам исследований разработана технология возделывания быстрорастущей ивы при плантажных посадках, адаптированная к различным экологическим условиям.

Результаты и их обсуждение. Технология легла в основу создания интерактивной модели расчета экономического баланса и оценки воздействия производства и доработки древесины ивы на окружающую среду. Модель реализована с использованием электронной таблицы MS Excel. Интерактивная модель позволяет рассчитывать экономический баланс, проводить оценку выбросов в окружающую среду и соответственно планировать производство древесины на биотопливо на основе показателей, сложившихся в конкретных условиях хозяйственной деятельности. Модель может быть трансформирована для анализа экономической и экологической эффективности производства других видов биотоплива. Себестоимость биотоплива, полученного с одного гектара плантации ивы, по нашим расчетам составляет около 600–800 долларов в год в зависимости от технологии. Оценка баланса парниковых газов показывает, что если Республика Беларусь получит возможность торговать квотами на выбросы парниковых газов, использование древесины ивы в качестве энергоносителя позволит дополнительно получить 3500–3700 евро с каждого гектара плантации ивы за весь срок ее эксплуатации (22 года).

Заключение. Расчеты показывают, что на местном уровне можно обеспечить определенный уровень рентабельности производства и использования древесины ивы на энергетические цели при сложившихся на сегодняшний день ценах на импортное топливо.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, математическое моделирование, быстрорастущая ива, планирование, экономическая эффективность, биотопливо, экологическое воздействие.

Planning Bio Fuel Production from Fast Growing Willow Wood on the Basis of Interactive Model

O.I. Rodkin, V.A. Ivaniukovich, A.A. Shabanov

Educational establishment «International State Ecological A.D. Sakharov University»

Interactive model elaborated on the basis of the technological map of cultivating fast growing willow, and which is supposed to be used in planning bio fuel production in definite economic conditions, is presented in the article.

The purpose of the study is to assess ecological and economical efficiency of the production of fast growing willow wood as a renewable bio fuel on the regional level, to calculate the balance of greenhouse gases while obtaining and using biomass on the basis of the interactive model.

Material and methods. Field experiments of cultivating fast growing willow were conducted in Mogilev, Grodno, Brest and Minsk Regions on different soils. Data were obtained on the impact of ecological factors on the dynamics of growth, development and productivity of willow. Technology of cultivating fast growing willow on plantations, which is adapted to different ecological conditions, was worked out on the basis of the research findings.

Findings and their discussion. Technology became the basis of the creation of an interactive model of the calculation of the economic balance and assessment of the impact of the production and additional treatment of willow wood on the environment. The model is implemented with the application of MS Excel. The interactive model makes it possible to calculate economic balance.

assess exhausts into the environment and, accordingly, plan production of wood for bio fuel on the basis of indicators of certain economic activity. The model can be transformed for the analysis of economic and ecological efficiency of the production of other types of bio fuel. The cost of bio fuel obtained from one hectare of the plantation of willow, according to our estimations, is 600–800 dollars a year depending on the technology. Assessment of the balance of greenhouse gases shows that if the Republic of Belarus gets an opportunity to sell greenhouse gasses exhaust quotas, application of willow wood as fuel will make it possible to additionally get 3500–3700 Euro from every hectare of willow plantation during the whole period of its use (22 years).

Conclusion. Calculations show that at the local level it is possible to provide a certain level of efficiency of the production and use of willow wood with the power needs at the present prices of imported fuel.

Key words: renewable power economy, mathematical modeling, fast growing willow, planning, economic efficiency, bio fuel, ecological impact.

В современном мире по мере истощения запасов ископаемого топлива все больше внимания уделяется развитию возобновляемой энергетики. В Республике Беларусь в рамках Национальной программы развития местных и возобновляемых энергоисточников на 2011–2015 годы поставлена задача по увеличению объемов использования собственных энергоресурсов, развитию новых для страны тенденций в области энергетики и увеличения доли местных видов энергетических ресурсов до 30 процентов [1]. Инновационным направлением в соответствии с программой является создание лесохозяйственными организациями плантаций быстрорастущих древесно-кустарниковых пород для топливно-энергетических целей [2].

Эксперименты по внедрению подобных плантаций начались с 70-х годов прошлого века. В настоящее время наиболее значительные площади таких посадок, которые получили наименование короткоциклового (short rotation coppice), возделываются в Швеции (около 13 тысяч гектаров), а также в Австрии, Германии, Норвегии, США, Канаде, Польше и других странах [3–6].

В качестве культур для производства биотоплива используются деревья и кустарники (ива, тополь, ольха, эвкалипт) либо быстрорастущие травы (мискантус, безалкалоидные сорта конопли и др.). В процентном отношении наибольшие площади заняты ивой, специальные клоны (сорта) которой обеспечивают максимальный выход продукции за единицу времени и низкую себестоимость получения энергии из биомассы [7–9].

Для эффективного внедрения таких плантаций в Республике Беларусь необходимо решение ряда задач, в том числе:

- создание маточных плантаций быстрорастущих ивы и тополя в Республике Беларусь, проведение сортоиспытаний, поддержание и внедрение в производство перспективных образцов;
- отработка логистики производства древесины на основе создания сырьевых зон;

- планирование технологической цепочки производства древесины и получения из нее энергии;
- проведение детального эколого-экономического обоснования производства древесины ивы как биоэнергетического сырья.

Часть из обозначенных проблем в настоящее время уже решена. Например, в Государственный реестр сортов Республики Беларусь в 2013 году впервые включены три сорта ивы сербско-белорусской селекции – Бачка, Волянка и Дрина. Сорта адаптированы к почвенно-климатическим условиям нашей страны и не уступают зарубежным аналогам по основным хозяйственно полезным признакам, характеризуются устойчивостью к заморозкам и быстрым накоплением биомассы. Кроме того, каждый из районированных сортов обладает определенной спецификой, что способствует оптимальному использованию его в конкретных условиях.

Другие вопросы, требующие своего решения, рассмотрены в данной статье.

Цель исследования – выполнить оценку эколого-экономической эффективности производства древесины быстрорастущей ивы в качестве возобновляемого биотоплива на региональном уровне, рассчитать баланс парниковых газов при получении и использовании биомассы на основе интерактивной модели.

Экономическое обоснование производства древесины быстрорастущей ивы требует решения следующих задач:

- оценки потенциальной урожайности для различных экологических условий;
- разработки адаптивной технологии возделывания;
- расчета финансовых затрат возделывания ивы;
- оценки потенциальной выручки при использовании (реализации) древесины.

Материал и методы. Наши исследования по возделыванию быстрорастущей ивы проводятся с 2005 года в различных почвенных и климатических условиях Республики Беларусь [10]. В частности, полевые эксперименты были заложены на выработанных и деградированных торфя-

никах, суглинистых, связных супесчаных и песчаных почвах. При трехлетнем цикле производства древесины на лучших участках товарный выход древесины составил 10–12 тонн за год.

На основе полученных данных предложены и апробированы методики расчета экономической и экологической эффективности предполагаемого производства биотоплива из древесины быстрорастущей ивы. Методики расчета реализованы в электронных таблицах, что делает их доступными для широкого использования в организациях страны.

Результаты и их обсуждение. По результатам экспериментов была разработана технология возделывания ивы, адаптивная к конкретным почвенно-климатическим условиям. Технология легла в основу разработки и составления технологических карт возделывания культуры, которые, в свою очередь, использованы для выполнения экономических расчетов.

Технологическая карта включает ряд основных блоков:

- подготовка участка и посадка черенков ивы;
- уход за посадками;
- уборка древесины;
- транспортировка;
- сушка древесины (выборочно).

Для расчета экономического и экологического обоснования применена интерактивная модель, разработанная по результатам наших исследований. Модель состоит из нескольких блоков:

1. Входные и выходные данные. В качестве входных данных используется ряд постоянных и переменных характеристик.

Постоянные характеристики рассчитаны на основе технологической карты возделывания ивы и для данной модели они неизменны. Например, нормативы выработки и амортизации техники, расхода топлива, последовательность технологических операций, период эксплуатации плантации ивы и др.

Срок использования плантации. Наши эксперименты проводятся с 2005 года и не позволяют говорить об оптимальном сроке эксплуатации плантации исходя из собственного опыта. В соответствии с данными зарубежных исследователей однократно заложенная плантация ивы предоставляет возможность получать не менее 7 урожаев без существенного снижения продуктивности. На основе опубликованных данных срок эксплуатации

плантации в наших расчетах принимается за 22 года [11].

Амортизация техники. Амортизационные отчисления рассчитывались на основе сложившейся практики производства в хозяйствах, где внедрены плантации быстрорастущей ивы. Как правило, срок использования обычной сельскохозяйственной техники (трактора, опрыскиватели, прицепы, измельчители биомассы и т.д.) рассчитывался на 10 лет. Далее эта стоимость переносилась на гектар ивы из расчета времени (в часах) применения техники для производства (доработки) продукции. Несколько иные расчеты принимались для специальной техники (сажалка и комбайн). Эти агрегаты могут использоваться только для плантаций ивы, соответственно годовая стоимость амортизировалась не на время работы, а на количество гектаров. Чем больше размер плантации, тем меньше норматив амортизационных отчислений.

Переменные характеристики вводятся специалистом с учетом конкретных условий производства древесины ивы. Например, площадь уборки, густота посадки, стоимость оплаты труда, ГСМ и расходных материалов, расстояние перевозки, урожайность древесины, стоимость полученной щепы, расход топлива для сушки щепы, покупка или аренда специализированной техники и др.

Специалист также может выбрать вариант посадки плантации ивы (ручная или промышленная) и ее уборки (ручная, прямое комбайнирование с дополнительной сушкой или уборка с последующим прессованием в рулоны).

Затраты можно рассчитать как на год, так и весь базовый срок эксплуатации плантации – 22 года.

2. График окупаемости. Этот блок позволяет оценить соотношение затрат и выручки по годам эксплуатации плантации, а также структуру затрат в зависимости от условий приобретения техники (рис. 1–2).

Пользователь программы имеет возможность изменять ряд входных данных, выбирать технологию и, таким образом, оптимально планировать производство с учетом структуры затрат. Например, при использовании комбайна с последующей дополнительной сушкой в искусственных условиях основная доля затрат ложится на уборку древесины. Производитель может планировать также затраты по годам эксплуатации плантации.

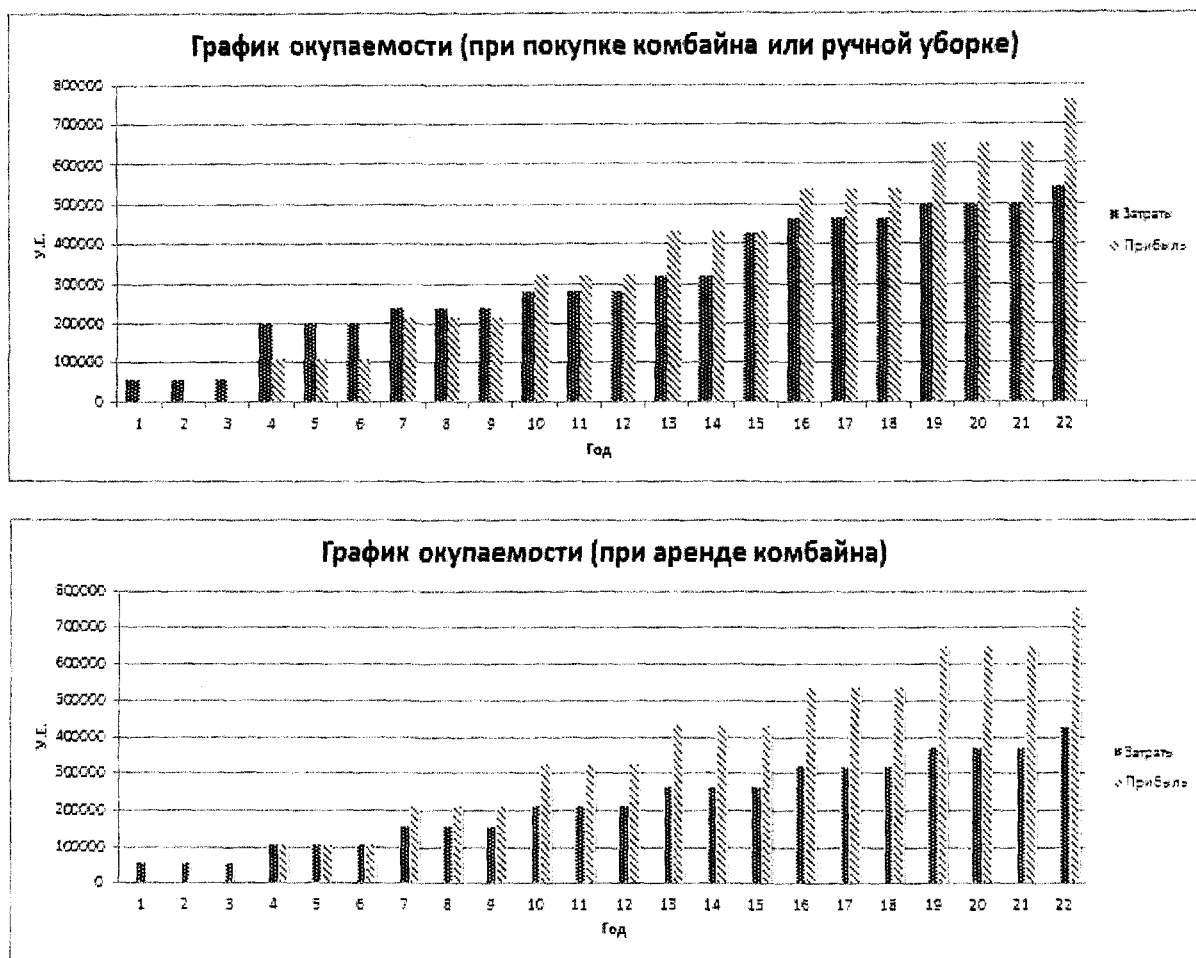


Рис. 1. Графики окупаемости производства древесины ивы.

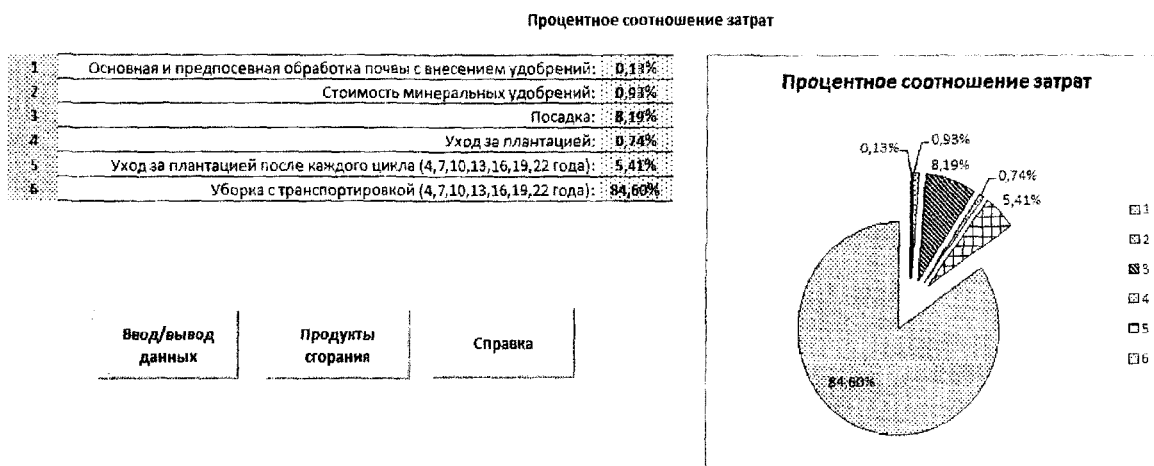


Рис. 2. Структура затрат при производстве древесины ивы с уборкой комбайном при его покупке.

1. Продукты сгорания. Блок позволяет дать экологическую оценку использованию древесины ивы в качестве биотоплива на основе анализа выбросов в окружающую среду, в том числе диоксида углерода (рис. 3). В соответствии с требованиями Киотского протокола древесина считается нейтральным топливом по отношению к парниковым газам. Вместе с тем производство биотоплива на основе древесины ивы требует применения определенного количества ископаемой энергии. Дизельное топливо потребляется на протяжении жизненного цикла продукции – в процессе закладки и эксплуатации плантации, транспортировки и доработки биомассы. Таким образом, из количества парниковых газов, которое выбрасывается в окружающую среду при условии замещения ископаемого топлива на древесину, необходимо вычесть выбросы, связанные с использованием дизельного топлива. Отображаемые на графике данные позволяют учесть эти показатели.

4. Справка. Блок содержит инструкции для пользователя программы.

Для расчета затрат по возделыванию и выручки от реализации продукции в соответствии с результатами наших исследований в модель вводились следующие базовые характеристики:

- *урожайность (выход древесины ивы).* Как было сказано ранее, биомасса ивы традиционно убирается каждые три года, начиная с четвертого от закладки плантации. Древесина ивы при уборке имеет достаточно высокую влажность (до 50%), поэтому при расчетах используется норматив относительно сухой древесины (10%);
- *размер участка.* В базовом расчете установлен минимальный размер участка, позволяющий получать прибыль – 30 га, что связано с амортизацией специальной техники;
- *густота посадки (количество черенков ивы на гектар).* Принята от 15000 до 18000 штук в зависимости от выбранной технологии;
- *стоимость посадочного материала.* В настоящее время в Беларуси внедрены собственные сорта сербско-белорусской селекции, что дает возможность ориентироваться на стоимость черенка не более 0,05 цента;
- *основные эксплуатационные затраты.* Необходимые для расчетов базовые затраты установлены с учетом сложившихся в стране цен:
 - оплата труда механизаторов – 3 доллара в час;
 - оплата неквалифицированных работников – 2 доллара в час;
 - стоимость топлива – 0,96 \$/литр;

- стоимость минеральных удобрений от 150 до 400 долларов за тонну в зависимости от вида (калийные, азотные, фосфорные);
- стоимость гербицидов (раундап, гезагарт) в среднем составила 15 долларов за литр;
- *сушка и измельчение.* В наших расчетах представлены две технологии возделывания ивы:
 - традиционная, при которой используется уборка комбайном (типа CLAAS) с одновременным измельчением и дальнейшей доработкой. Недостатком является необходимость дополнительной сушки биомассы для снижения ее влажности, для чего требуются дополнительные ресурсы и соответственно финансы;
 - раздельная, когда биомасса срезается и убирается специальным пресс-подборщиком в тюки, с последующей сушкой в полевых (естественных) условиях, доработкой и измельчением;
- *стоимость техники и оборудования.* Стоимость для расчетов бралась на основе сложившихся в Республике Беларусь на настоящий момент цен в долларовом эквиваленте. Стоимость специальной техники:
 - сажалка – Step 2-6A Modular (Швеция) – 12000 долларов;
 - комбайн CLAAS (Германия) – 120 тысяч долларов;
 - пресс Biobaler (Канада) – 105 тысяч долларов.

Закключение. По результатам наших расчетов себестоимость биотоплива, полученного с одного гектара плантации ивы, составляет около 600–800 долларов в год в зависимости от технологии. При выходе древесины около 50 тонн сырой биомассы с гектара раз в три года количество сэкономленной энергии составит около 4,4 т условного топлива в год, что эквивалентно 3850 м³ природного газа. В настоящее время стоимость российского природного газа для Республики Беларусь составляет около 230 долларов за 1000 м³. Это значит, что если природный газ заменить древесиной, то можно обеспечить определенный уровень рентабельности даже при сложившихся на сегодняшний день ценах.

Дополнительную прибыль потенциально можно получить, если Республика Беларусь получит возможность торговать квотами на выбросы парниковых газов. При стоимости одной тонны диоксида углерода 10 евро использование древесины ивы в качестве энергоносителя позволит дополнительно получить 3500–3700 евро с каждого гектара плантации ивы за весь срок ее эксплуатации (22 года) за счет экономии квот согласно Киотскому протоколу.

Продукты сгорания

Год	Дизель, кг	Ива, $2 \cdot 10^4$, кг	Квота CO_2 , $2 \cdot 10^4$, кг
1	178,493	0,000	-0,892
2	178,493	0,000	-0,892
3	178,493	0,000	-0,892
4	3435,787	8904,978	8887,799
5	3435,787	8904,978	8887,799
6	3435,787	8904,978	8887,799
7	6693,081	17809,957	17776,491
8	6693,081	17809,957	17776,491
9	6693,081	17809,957	17776,491
10	9950,375	26714,935	26665,183
11	9950,375	26714,935	26665,183
12	9950,375	26714,935	26665,183
13	13207,668	35619,913	35553,875
14	13207,668	35619,913	35553,875
15	13207,668	35619,913	35553,875
16	16464,962	44524,891	44442,566
17	16464,962	44524,891	44442,566
18	16464,962	44524,891	44442,566
19	19722,256	53429,870	53331,258
20	19722,256	53429,870	53331,258
21	19722,256	53429,870	53331,258
22	22979,550	62334,848	62219,550

© 2014 International Sakharov Environmental University EcoSide v1.4

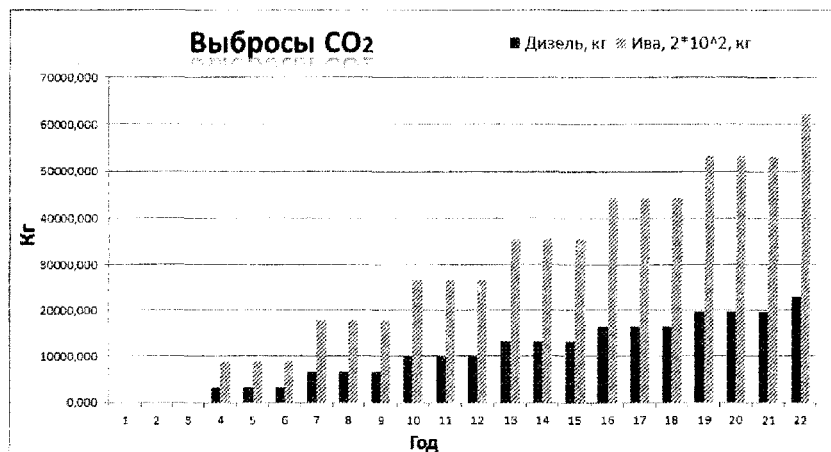


Рис. 3. Выбросы диоксида углерода при сжигании древесины ивы и дизельного топлива.

Интерактивная модель дает возможность рассчитывать экономический баланс, проводить оценку выбросов в окружающую среду и соответственно планировать производство древесины на биотопливо на основе показателей, сложившихся в конкретных условиях хозяйственной деятельности. Модель может легко трансформироваться для анализа экономической и экологической эффективности производства других видов биотоплива.

ЛИТЕРАТУРА

- Об утверждении Национальной программы развития местных и возобновляемых источников на 2011–2015 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 10 мая 2011 г., № 586.
- Головков, С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденов. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 224 с.
- Rodzkin, A. Biomass Production in Energy Forests / A. Rodzkin, J. Mosiej, A. Karczmarczyk, K. Wyporska // Ecosystem Health and Sustainable Agriculture 3. Editors: Lars Rydén and Ingrid Karlsson / The Baltic University Programme. – Uppsala, 2012. – P. 196–202.
- Information on declared energy crop area. – Warsaw: Agency for Restructuring and Modernizing of Agriculture, 2007.
- Schweier, J. Harvesting of short rotation coppice – harvesting trials with a cut and storage system in Germany / J. Schweier & G. Becker // Silva Fennica, 2012. – Vol. 46, No 2. – P. 287–299.
- Slow expansion and low yields of willow short rotation coppice in Sweden; implications for future strategies / I. Dimitriou, H. Rosenqvist, G. Berndes. – Gothenburg, 2011.
- Rosenqvist, H. Energy crop production costs in the EU (RENEW project) Lund University / H. Rosenqvist and L. Nilsson. – Lund: Lund University, 2007.
- Krasuska, E. Economics of energy crops in Poland today and in the future / E. Krasuska, H. Rosenqvist // Biomass and Bioenergy. – 2011.
- Willow Biomass Producer's Handbook / L.P. Abrahamson [et al.]. – N. Y.: State University of New York, 2002. – 31 p.
- 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.

- Fenn, L.B. Willow tree productivity on fertilizer solutions containing various Ca/Al ratios / L.B. Fenn, G.R. Gobran // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 1999. – Vol. 53, № 2. – P. 121–131.

REFERENCES

- 10.05.2011 № 586 Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus «On Approving the National Program of the Development of Local and Renewable Power Sources for the Years of 2011–2015».
- Golovkov S. I., Koperin I.F., Naidenov V.I. Energeticheskoye ispolzovaniye drevesnykh otkhodov [Power Application of Wood Wastes], M.: Lesn. promyshlennost, 1987, 224 p.
- A.Rodzkin, J.Mosiej, A.Karczmarczyk, K.Wyporska Biomass Production in Energy Forests. p. 196–202 // Ecosystem Health and Sustainable Agriculture 3. Editors: Lars Rydén and Ingrid Karlsson © The Baltic University Programme, Uppsala University, 2012, 325 p.
- Information on declared energy crop area. Warsaw: Agency for Restructuring and Modernizing of Agriculture; 2007.
- Schweier, J. & Becker, G. Harvesting of short rotation coppice – harvesting trials with a cut and storage system in Germany, 2012. Silva Fennica, 46(2), pp. 287–299.
- Dimitriou I, Rosenqvist H, Berndes G. Slow expansion and low yields of willow short rotation coppice in Sweden; implications for future strategies, SE 41296 Gothenburg, Sweden, 11.
- Rosenqvist H, Nilsson L. Energy crop production costs in the EU (RENEW project) Lund University. Lund: Lund University, 2007.
- Krasuska E, Rosenqvist H, Economics of energy crops in Poland today and in the future, Biomass and Bioenergy, 2011, doi:10.1016/j.biombioe.2011.09.011.
- Abrahamson L.P. Willow Biomass Producer's Handbook, State University of New York, 2002.
- Rodzkin O. I. Proizvodstvo vozobnovlyayemogo biotopliva v agrarnykh landshtakh: ekologicheskiye i tekhnologicheskiye aspekty: monografiya [Manufacture of Renewable Biofuel in Agrarian Landscapes: Ecological and Technological Aspects: Thesis], Minsk: MGEU im. A.D.Sakharov, 2011, 212 p.
- Fenn, L. B. Willow tree productivity on fertilizer solutions containing various Ca/Al ratios / L. B. Fenn, G. R. Gobran // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 1999. – Vol. 53(2). – P. 121–131.

Поступила в редакцию 13.03.2014. Принята в печать 21.04.2014
Адрес для корреспонденции: e-mail: aleh.rodzkin@rambler.ru Родькин О.И.