

УДК 620.9:573:574

Сельскохозяйственное лесоводство как метод снижения воздействия на окружающую среду в агроэкосистемах

Канд. биол. наук **Родькин О. И.**, aleh.rodzkin@iseu.by,

Пронько С. К., claire_pronko@mail.ru

Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, Республика Беларусь, г. Минск, 220070, ул. Долгобродская, 23

Сельскохозяйственное лесоводство это направление, развитие которого позволяет получить как экономический, так и экологический эффект. Снижение воздействия на окружающую среду при выращивании древесины ивы на биотопливо может быть обеспечено на основе борьбы с эрозией, предотвращения загрязнения водных объектов, рекультивации загрязненных территорий. Многолетние эксперименты по возделыванию быстрорастущей ивы в различных экологических условиях показали, что растения могут обеспечивать удовлетворительный урожай на низкоплодородных выработанных торфяниках, не накапливают радиоактивный ^{137}Cs в количествах превышающих допустимый уровень его содержания в древесине и имеют низкие коэффициенты накопления тяжелых металлов. Использование древесины ивы в качестве энергоносителя позволит потенциально получить 3500-3700 евро с каждого гектара плантации ивы за весь срок ее эксплуатации за счет экономии квот на выбросы парниковых газов согласно Киотскому Протоколу.

Ключевые слова: биоэнергетика, экология, биотопливо, аграрное лесоводство, ива.

Agroforestry as a method for minimization of environmental impact in agricultural ecosystems

Rodzkin O.I. aleh.rodzkin@iseu.by, **Pronko S.K.** claire_pronko@mail.ru

International state environmental University. A.D. Sakharov,
Republic of Belarus, Minsk, 220070, ul. Dolgobrodskaya, 23

Agroforestry is a method that enables to get as economical so and environmental effect. Minimization of environmental impact at the result of willow biomass production may be realized on the base of erosion and water pollution control and reclamation of contaminated areas. Our experiments with willow cultivated in different environmental conditions show, that it is possible to get adequate yield of willow wood on post-mining peat lands, and plants do not accumulate extra quantity of radionuclide ^{137}Cs and some heavy metals. Utilization of willow wood as a biofuel enables to get additionally 3500 – 3700 euro per hectare for all period of plantation existing. It will be possible at the result of saving greenhouse gases in accordance with Kyoto Protocol.

Key words: bioenergy, ecology, biofuel, agroforestry, willow.

Приблизительно с середины прошлого века сельское хозяйство стало на путь интенсификации, основными составляющими которой являются комплексная механизация, химизация, мелиорация и интенсивное животноводство. К негативным последствиям интенсификации в первую очередь относится усиление экологического воздействия аграрных экосистем на окружающую среду.

Результаты этого воздействия обуславливают следующие экологические проблемы: **Деградация** земель, одним из ключевых факторов которой является водная, ветровая и биологическая эрозия, которая проявляется на торфяных почвах.

Загрязнение земель радионуклидами, тяжелыми металлами и другими химическими элементами и соединениями.

Физическое, химическое и биологическое **загрязнение** атмосферного воздуха, включая выбросы парниковых газов.

Эвтрофикация водоемов вследствие химизации и интенсификации животноводства [2].

Одним из направлений, позволяющих контролировать и в определенной степени управлять процессами негативного воздействия на агроэкосистемы, является сельскохозяйственное (аграрное) лесоводство.

В зарубежных странах известным термином является *Agroforestry*, что можно определить как сельскохозяйственное лесоводство, которое основано на использовании специально культивируемых древесных насаждений, которые возделываются как обычные культуры и занимают определенное место в агроландшафте [16].

Потенциальная экологическая выгода от его внедрения в аграрном секторе включает следующие возможности:

- Поддержание почвенного плодородия и торможение процессов деградации почв;
- Улучшение качества воздушной среды. Это может быть реализовано за счет снижения уровня пыли, запаха, шума и т.д.;
- Улучшение качества водных ресурсов, так как древесные насаждения могут служить естественными вегетативными фильтрами;
- Сохранение и увеличение биологического разнообразия;
- Сокращение выбросов парниковых газов.
- Улучшение рекреационного потенциала и внешнего вида территории.

Изучение потенциала подвидов и гибридов ивы, тополя, осины, лещины и других древесных насаждений активно проводится в ряде зарубежных стран. Одним из направлений, является возделывание специальных пород быстрорастущей ивы, что позволяет получать древесину, которая может быть использована как источник энергии на 3-4-й год после посадки плантации. [13,17,18,19].

Наряду с обеспечением энергетического сектора биотопливом, плантации ивы используются как эффективный метод экологического менеджмента в экосистемах.

Так, использование потенциала быстрорастущих подвидов ивы в качестве вегетативных фильтров для частичной утилизации сбросных сточных вод было изучено в условиях Швеции [7,8]. Эксперименты показали высокую эффективность таких посадок в частности для утилизации азота и фосфора, которые являются основными биогенными загрязнителями водоемов.

В ряде экспериментов изучался потенциал ивовых посадок для утилизации навозных стоков и грязевых осадков с полей фильтрации, очистных сооружений и биологических прудов. Исследования подтвердили возможность выращивания ивы на участках, загрязненных тяжелыми металлами [9, 14,15].

Эксперименты с использованием плантаций ивы для реабилитации выработанных торфяников проводились в Канаде и США [11,12]. Результаты показали, что ивовые плантации могут успешно произрастать на таких участках.

Потенциальная возможность выращивания ивы на загрязненных радионуклидами землях подтверждается данными шведских исследователей [10].

В наших экспериментах изучался потенциал ивовых плантаций с точки зрения восстановления нарушенных экологических систем и снижения воздействия на окружающую среду.

Результаты исследования и обсуждение

Полевые эксперименты проводились на протяжении десяти лет в различных экологических условиях.

Выработанные торфяники.

Выработанные торфяники представляют собой территории, которые освободились после прекращения добычи торфа. Они являются крайне неоднородными по составу, водному и питательному режиму, степени разложения торфа и потенциально низкоплодородными.

Несмотря на сложности получения продукции, в частности древесины ивы на выработанных торфяниках, интерес к ним обусловлен, во-первых, большими площадями таких земель, во-вторых возможностью их рекультивации и в-третьих получением дополнительной биомассы, пусть и меньшей урожайности по сравнению с плодородными минеральными почвами.

Варианты опыта включали торфяники различного состава и степени разложения.

В-1. Низинный торфяник с глубиной торфяной залежи более 50 см (с высокой степенью разложения торфа).

В-2. Низинный торфяник с глубиной торфяной залежи более 50 см (с низкой степенью разложения торфа).

В-3. Низинный органно-минеральный с глубиной торфяной залежи до 30 см.

В-4. Переходный тип (высокая степень минерализованности почвы).

В результате исследований установлено, что выработанные торфяники можно эффективно использовать для получения древесины ивы при трехлетнем цикле возделывания между периодами уборки [20]. Корневая система ивы на выработанных торфяниках развивается менее интенсивно, чем на минеральных почвах и при достижении 3–4 м высоты растения практически останавливаются в росте и набирают биомассу только за счет увеличения диаметра. Динамика высоты растений ивы за три года представлена на рисунке 1.

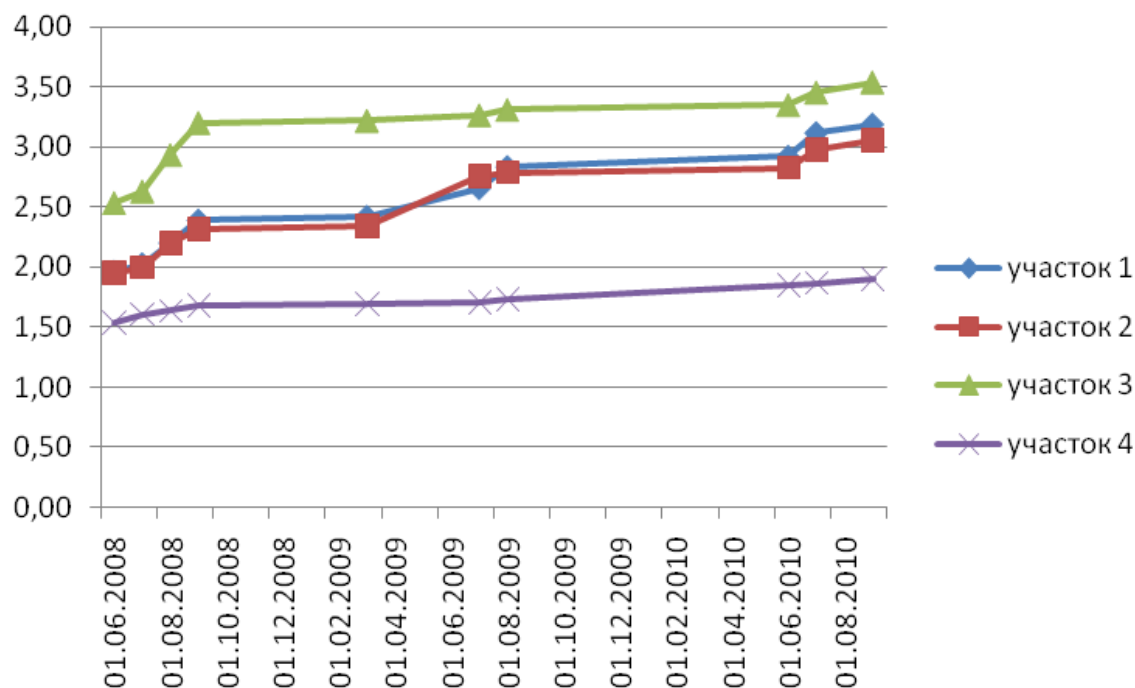


Рис. 1. Динамика высоты растений ивы. 2008–2010 гг.

Продуктивность биомассы ивы при трехлетнем цикле возделывания на вариантах с хорошо разложившимся торфом уступает урожайности растений полученной на минеральных землях на 15-20%. Тем не менее, снижение продуктивности может быть компенсировано за счет поддержания разнообразия, снижения выбросов парниковых газов, рекультивации территорий.

Земли, загрязненные радионуклидами.

Одним из условий возделывания сельскохозяйственных культур на почвах, загрязненных радионуклидами, является получение растениеводческой продукции, соответствующей по содержанию радионуклидов нормативным требованиям (РДУ-99) [5].

В Беларуси после аварии на Чернобыльской АЭС выведены из сельскохозяйственного оборота земли с плотностью загрязнения цезием-137 свыше 40 Ки/км², стронцием-90 свыше 3 км/км². Сельскохозяйственные угодья, характеризующиеся плотностью загрязнения почв цезием-137 от 15 до 40 Ки/км² могут быть использованы в сельскохозяйственном производстве при проведении дополнительной мелиорации почв. При плотности загрязнения почв сельхозугодий цезием-137 менее 15 и стронцием-90 менее 2 Ки/км² допускается ведение сельскохозяйственного производства с использованием приемов, ограничивающих поступление радионуклидов в продукцию.

В результате наших исследований проведенных при плотности загрязненности участков радиоцезием до 8 Ки/км² установлено, что уровень загрязнения древесины не превышал 12 Бк/кг при Республиканском допустимом уровне (РДУ 99) не выше 740. По результатам исследований были составлены прогнозные модели загрязнения древесины радионуклидами на срок до 25 лет [6].

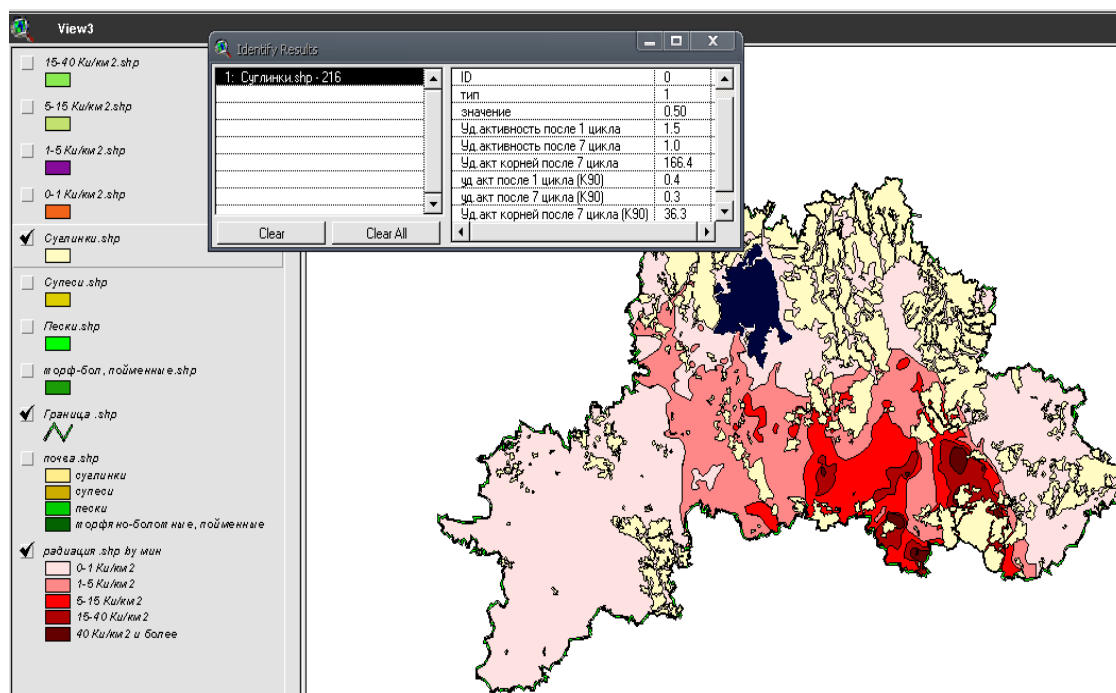


Рис. 2. Интерактивная модель прогноза загрязнения древесины и корней ивы при различной плотности загрязнения.

Расчеты показывают, что производство биотоплива соответствующего нормам РДУ для древесины возможно при уровне загрязненности почвы до 925 кБк/м² и биомассы корней при уровне загрязненности почвы до 370 кБк/м² на всем протяжении жизненного цикла существования плантации (22 года от момента посадки). Внесение калийных удобрений в дозе 90 кг/га позволяет получить нормативно соответствующую РДУ биомассу корней при плотности загрязнения до 740 кБк/м².

Земли загрязненные тяжелыми металлами

Тяжелые металлы и их соединения могут оказывать вредное воздействие на организм человека и состояние природных экологических систем, способны накапливаться в тканях, вызывая ряд заболеваний. К числу наиболее опасных для биологических объектов элементов относятся в частности свинец и кадмий.

Металлы сравнительно быстро накапливаются в почве и крайне медленно из нее выводятся, например, период полуразрушения в естественных условиях Zn составляет до 500 лет, Cd – 1100, Сг– 1500, Рb – несколько тысяч лет [1].

Наши исследования проводились на территории Кричевского района Могилевской области, почвы которого являются одними из самых загрязненных по тяжелым металлам не только в области, но и в Республике Беларусь.

Результаты экспериментов показывают, что коэффициенты биологического накопления таких тяжелых металлов, как Cd, Рb, Ni из почвы в листья не велики (таблица 2).

Таблица 2. Среднее содержание валовых форм тяжелых металлов в почве и листьях и коэффициенты накопления в листьях ивы, мг/кг

Объект	Тяжелые металлы					
	Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn
Почва	2,02 ± 0,83	43,93 ± 8,32	18,46 ± 2,71	9,35 ± 1,39	5,99 ± 2,04	661,76 ± 230,03
Листья	0,12 ± 0,05	96 ± 43,9	0,98 ± 0,44	2,55 ± 0,77	0,29 ± 0,17	70,74 ± 30,12
КБН	0,06	2,5	0,05	0,31	0,08	0,13
ПДК, ОДК	2,0	220,0	32,0	132,0	80,0	1500

В то же время растения ивы могут накапливать медь и особенно цинк. Как было упомянуто выше, данные элементы имеют важное значение для жизнедеятельности растений и в ряде случаев используются в качестве минеральных удобрений. Следовательно, растения ивы могут успешно развиваться на почвах с невысоким содержанием меди и цинка, например, на выработанных и деградированных торфяниках без дополнительных подкормок.

Было установлено, что внесение калийных удобрений стимулирует накопление таких тяжелых металлов, как цинк, марганец и медь, и не оказывает существенного влияния на поступление в растения ивы кадмия и свинца. Технология возделывания ивы предусматривает высокие нормы внесения калия. Таким образом, продуктивность ивы на бедных почвах с низким содержанием микроэлементов будет стимулироваться, в то же время растения могут эффективно выращиваться на землях, характеризующихся повышенным уровнем загрязнения свинца и кадмия, например, вдоль дорог или вблизи промышленных объектов. Полученная древесина может быть использована в качестве биотоплива [4].

Оценка выбросов в окружающую среду

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

- Выработанные торфяники. В пересчете на 10% влажность выход древесной биомассы составил 7620 кг. сухой древесины с гектара в среднем год;
- Суглинистые почвы. При трехлетнем цикле выращивания выход древесной биомассы составил в пересчете на 10% влажность 9100 кг древесины с гектара в среднем за год;
- Связные супесчаные почвы. Товарный выход древесины по результатам экспериментов составил 10-12 тонн в среднем за год.

По результатам наших экспериментов была предложена 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 и экологических расчетов [3].

Технологическая карта включает ряд основных блоков:

- Подготовка участка и посадка черенков ивы
- Уход за посадками
- Уборка древесины
- Транспортировка
- Сушка древесины (выборочно).

В соответствии с решениями Киотского Протокола древесина считается нейтральным топливом по отношению к парниковым газам. Вместе с тем, производство биотоплива на основе древесины ивы требует использования определенного количества ископаемой энергии. Дизельное топливо и бензин потребляется на протяжении жизненного цикла продукции, то есть в процессе закладки и эксплуатации плантации, транспортировки и доработки биомассы. Таким образом, то количество парниковых газов, которое выбрасывается в окружающую среду при условии замещения ископаемого топлива на древесину нельзя рассматривать как полностью сэкономленную для страны квоту. Из этого количества необходимо вычесть выбросы, связанные с использованием ископаемого топлива.

Установленная в наших экспериментах теплота сгорания сухой массы древесины ивы колеблется от 17,85 до 19,08 МДж/кг. При средней теплоте сгорания 18 МДж/кг, в пересчете на год с одного гектара плантации ивы можно получить 4,4 тонны условного топлива (т.у.т), что эквивалентно примерно 3,9 тысячам м³ природного газа и 3,2 тонны топочного мазута.

При уборке и сжигании древесины ивы через три года за весь срок эксплуатации плантации (22 года) количество выбросов СО² в окружающую среду в расчете на гектар составит около 370 тонн. Выбросы, связанные с потреблением дизельного топлива при применении технологии с уборкой древесины в рулоны и без дополнительной сушки суммарно составят 2,5 тонны.

При использовании технологии с прямой уборкой и дополнительной сушкой древесины баланс выбросов составит соответственно 370 тонн от биотоплива и около 20 тонн от использования дизельного топлива.

При сложившемся рынке в Системе европейского союза по торговле выбросами (EU ETS), стоимость одной тонны диоксида углерода составляет около 10 евро. Таким образом, замещение древесиной ивы ископаемого топлива в качестве энергоносителя позволит потенциально дополнительно получить 3500-3700 евро с каждого гектара плантации ивы за весь срок ее эксплуатации.

С точки зрения воздействия на окружающую среду важное значение имеет сравнение выбросов оксидов серы и азота при производстве энергии из эквивалентного в пересчете на условное топливо количества древесины, угля, газа или мазута, который считается резервным сырьем для энергетики.

Одна тонна древесины при влажности 20% (оптимальная для котлов на биотопливе) по теплоте сгорания эквивалентна 0,63 т.у.т, 5500 м³ природного газа и 0,45 т.у.т. топочного мазута.

На рисунке 3 представлена диаграмма выбросов в окружающую среду при использовании различных видов топлива.

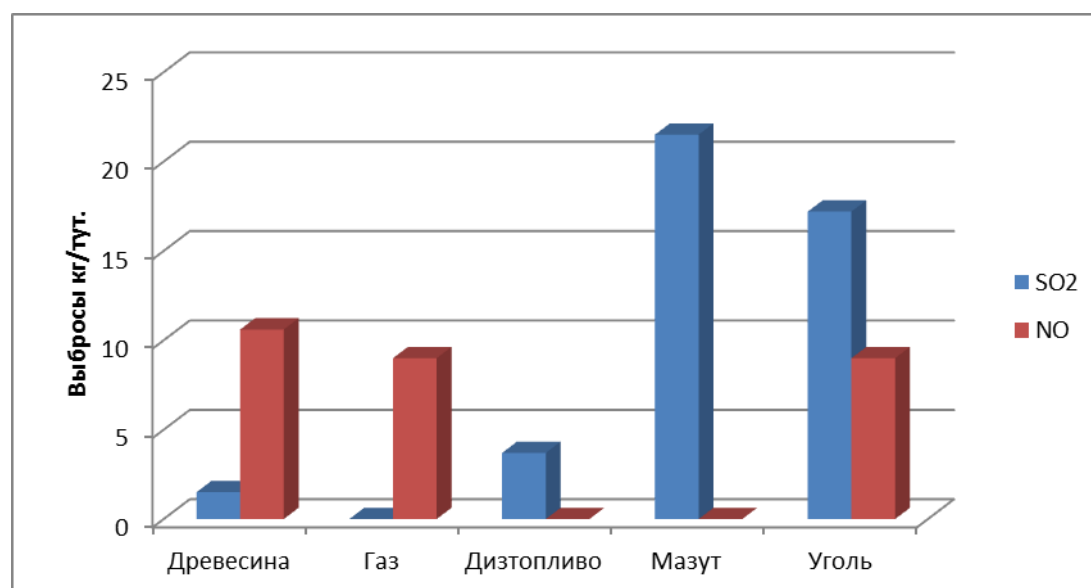


Рис. 3. Выбросы оксидов серы и азота в расчете на тонну условного топлива от различных энергоносителей.

При использовании древесины в окружающую среду выбрасываются как диоксид серы, так и оксиды азота, в то время как при сжигании газа или мазута только один из этих компонентов. Оксиды азота и серы относятся к третьему классу опасности и примерно сопоставимы по степени ущерба для окружающей среды. Исходя из представленных данных, можно заключить, что древесина ивы как топливо с точки зрения воздействия на окружающую среду превосходит мазут и уголь, но уступает природному газу и дизельному топливу.

Заключение

По результатам наших исследований можно сделать следующие выводы:

1. Сельскохозяйственное лесоводство является эффективным методом позволяющим снизить воздействие на окружающую среду в агроэкосистемах. Одним из направлений аграрного лесоводства является выращивание быстрорастущих деревьев, продукция которых может быть использована как биомасса, на энергетические цели, а сами посадки имеют большое экологическое значение. Снижение воздействия на окружающую среду может быть реализовано на основе внедрения вегетативных фильтров для предотвращения загрязнения водных объектов, реабилитации загрязненных земель, борьбы с эрозией и других направлений.

2. Многолетний опыт возделывания быстрорастущей ивы в различных экологических условиях показал, что растения могут обеспечивать удовлетворительный урожай на низкоплодородных выработанных торфяниках, не накапливают радиоактивный ¹³⁷Cs в количествах превышающих допустимый уровень его содержания в древесине при уровне загрязненности почвы до 925 кБк/м² и в биомассе корней при уровне загрязненности почвы до 370 кБк/м² на всем протяжении жизненного цикла существования плантации. Коэффициенты накопления тяжелых металлов в биомассу ивы позволяют возделывать ее на загрязненных кадмием, свинцом и никелем территориях при определенных условиях.

3. Оценка жизненного цикла древесины ивы показывает, что затраты ископаемого топлива для ее возделывания на несколько порядков ниже количества энергии которое можно получить из биомассы ивы, При средней теплоте сгорания сухой массы древесины 18 МДж/кг, в пересчете на год с одного гектара плантации ивы можно

получить 4,4 тонны условного топлива. 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 за счет экономии квот на выбросы парниковых газов согласно Киотскому протоколу.

Список литературы

1. Ивлев, А. М. Биогеохимия / А. М. Ивлев. – М. : Высш. шк., 1986. – 125 с.
2. Родькин, О. И. Сельскохозяйственная экология: учеб.-метод. пос. / О. И. Родькин, Т. М. Дайнеко, Л. А. Веремейчик. – Минск : БАТУ, 2001. – 191 с. (156)
3. Родькин О.И. Экономические аспекты производства возобновляемой энергии из древесины быстрорастущей ивы. Электронный Научный журнал СПбГУНиПТ, серия «Экономика и экологический менеджмент», № 2, 2013
4. 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.
5. Сельскохозяйственная радиоэкология/ Под ред. Р.М. Алексахина.—М: Экология, 1991.— С. 400.
6. Aleh I. Rodzkin, Vladimir A. Ivanykovich, Svetlana K. Pronko, Elena V. Kresova. Willow wood production on radionuclide polluted areas.//Proc. Natural Science, Matica Sprska Novi Sad, № 119, 105-113, 2010
7. Aronsson, P. G. Long-term influence of intensively cultured short-rotation Willow Coppice on nitrogen concentrations in groundwater / P. G. Aronsson, L. F. Bergstrom, S. N. E. Elowson // Journal of Environmental Management. – 2000. – Vol. 58(2). – P. 135–145.
8. Aronsson, P. G. Nitrate leaching from lysimeter-grown short-rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type / P. G. Aronsson, L. F. Bergstrom // Biomass & Bioenergy. – 2001. – Vol. 21(3). – P. 155–164.
9. As, Cd, Pb and Zn uptake by Salix spp. clones grown in soils enriched by high loads of these elements / M. Vyslouzilova, P. Tlustos [et al.] // Plant Soil & Environment. – 2003. – Vol. 49(5). – P. 191–196.
10. Brittain, J. E. A long-term study of radiocesium transport to a subalpine lake from its catchment / J. E. Brittain, H. E. Bjoernstad // International symposium on ionizing radiation. – Stockholm, 1996.
11. Bungart, R. Production of biomass for energy in post-mining landscapes and nutrient dynamics / R. Bungart, R. F. Huttl // Biomass & Bioenergy. – 2001. – Vol. 20(3). – P. 181–187.
12. Cooper, D. J. Restoring the vegetation of mined peatlands in the southern Rocky Mountains of Colorado, USA / D. J. Cooper, L. H. MacDonald // Restoration Ecology. – 2000. – Vol. 8(2). – P. 103–111.
13. I. Dimitriou, H. Rosenqvist. Sewage sludge and wastewater fertilisation of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production Biological and economic potential. Biomass and bioenergy 35 (2011) 835-842

14. Elowson, S. Willow as a vegetation filter for cleaning of polluted drainage water from agricultural land / S. Elowson // *Biomass & Bioenergy*. – 1999. – Vol. 16(4). – P. 281–290.
15. 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.
16. Greenbook 2002. Sustaining People, Land and Communities, Minnesota Department of Agriculture, p.75
17. Labrecque, M. Influence of plantation site and wastewater sludge fertilization on the performance and foliar nutrient status of two willow species grown under SRIC in southern Quebec (Canada) / M. Labrecque, T. I. Teodorescu // *Forest Ecology & Management*. – 2001. – Vol. 150(3). – P. 223–239.
18. Labrecque, M. High biomass yield achieved by *Salix* clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada / M. Labrecque, T. I. Teodorescu // *Biomass & Bioenergy*. – 2003. – Vol. 25(2). – P. 135–146.
19. Lawrence P. Abrahamson, Timothy A. Volk, Richard F. Kopp, Jennifer L. Ballard. Willow Biomass Producer's Handbook. State University of New-York. Revised January, 2002
20. Rodzkin, A. The assessment of the environmental benefit of fast-growing energy willow cultivated for renewable biomass supplying / A. Rodzkin, S. Pazniak, C. Romanovsky // *Proceeding of the International Conference on Environment: Survival and sustainability 19–24 Febr. 2007*. – Nicosia-Northern Cyprus : Near East University, 2007. – P. 1673–1683.