

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЫСТРОРАСТУЩИХ ДРЕВЕСНЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ

О.И. Родькин

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Фиторемедиация является одним из эффективных методов для очистки и восстановления почвенных экосистем. Целью наших исследований была оценка потенциала фиторемедиации тяжелых металлов и биогенных элементов (фосфор, азот), растениями ивы, которые не обладают выраженными аккумуляционными способностями, но вследствие быстрого прироста биомассы способны эффективно очищать загрязненные почвы. Полевые эксперименты проводились в 2011 - 2015 гг. на дерново-подзолистых суглинистых почвах двух регионов Республики Беларусь. Коэффициенты биологического накопления для кадмия, свинца, никеля и марганца были ниже единицы, что не позволяет аккумулировать значительное количество этих элементов, за исключением марганца. Платации ивы можно эффективно использовать на загрязненных марганцем почвах, в то же время растения не испытывают отрицательного воздействия (при умеренном содержании в почве) кадмия и свинца. Коэффициенты биологического накопления меди и цинка, превышали единицу, что будет иметь положительный эффект для растений ивы, особенно на почвах с невысоким содержанием этих элементов. Дополнительное внесение в почву калия стимулирует накопление меди, в меньшей степени цинка и марганца и практически не оказывает влияние на поступление свинца, никеля и кадмия. Вынос фосфора и азота с биомассой позволяет позитивно оценивать перспективы использования посадок ивы в качестве вегетативных фильтров для предотвращения эвтрофикации водных объектов.

Ключевые слова: фиторемедиация, тяжелые металлы, биогенные элементы, эвтрофикация.

THE ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF FAST GROWING TREES USING FOR PHYTOREMEDIATION OF CONTAMINATED ECOSYSTEMS

O.I. Rodkin

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Phytoremediation it is effective method for cleaning and rehabilitation of soils ecosystems. The goal of our investigation was the assessment of willow trees potential for phytoremediation of heavy metals and biogenic elements (phosphorus and nitrogen). Willow it is not hyperaccumulator, but it may clean the soil effectively because of fast growth and big biomass. The field experiments were conducted in 2011-2015 on sandy-loam soils in two regions of Belarus. The transfer factors for cadmium, lead, nickel and manganese have been less than one unit. It is not possible to accumulate a lot of these elements (with the exemption of manganese) by willow trees. It means, that willow plantations may be used for cultivation on the soils which are contaminated with manganese, and willow trees will be also resistant to influence of cadmium and lead. The transfer factors for copper and zinc were more than one unit and it has positive effect for willow trees, which are cultivated on the soils with low contents of microelements. The additional application of potassium in the greatest degree stimulate accumulation of copper, also have a positive effect for accumulation of zinc and manganese, and not has influence on accumulation of cadmium, lead and nickel. The accumulation of phosphorus and nitrogen with willow biomass

support a good perspective for using willow plantations as a vegetative filter, which may prevent the eutrophication of water objects.

Keywords: phytoremediation, heavy metals, biogenic elements, eutrophication.

Фиторемедиация это комплекс методов очистки сточных вод, грунтов и атмосферного воздуха с использованием зеленых растений. Методы фиторемедиации становятся все более востребованными для сохранения и восстановления экологических систем, что связано как с их сравнительно невысокой стоимостью, так и отсутствием выраженных экологических рисков. Использование тех или иных видов растений в целях фиторемедиации зависит от загрязнителей экосистем. Существуют виды зеленых растений, которые способны аккумулировать загрязнители в корнях, стеблях или других частях в значительных количествах вследствие высоких коэффициентов биологического накопления в системе “почва-растения”. Такие накопители получили название гипераккумуляторы [24].

Одной из серьезнейших экологических проблем, связанных с промышленной деятельностью, сельскохозяйственным производством и использованием транспорта, является загрязнение почв тяжелыми металлами. В частности, в Республике Беларусь в ряде мест, прилегающих к крупным животноводческим комплексам и вблизи городов, превышение предельно допустимой концентраций (ПДК), по цинку отмечено на 180 тыс. га, по меди – на 260 тыс. га, по свинцу и кадмию - соответственно на 100 тыс. и 45 тыс. га сельскохозяйственных угодий [3].

К гипераккумуляторам тяжелых металлов относится рапс масличный. Потенциал этой культуры к накоплению таких тяжелых металлов как Cd, Hg, Pb, Zn, As, и Ni оценивался в условиях вегетационного эксперимента [21]. Результаты показали, что наиболее эффективно накапливался цинк в корнях растений (коэффициент биологического накопления 1.8). При этом использование рапса для этих целей позволяет решать две задачи: очищение территории и получение возобновляемой энергии.

Перспективность использования растений семейства *Brassicaceae* как гипераккумуляторов тяжелых металлов подтверждается результатами ряда других экспериментов [4, 10, 20]. При этом отмечается, что особый интерес для целей фиторемедиации тяжелых металлов представляют растения рода *Thlaspi* и *Arabidopsis*, которые активно накапливают в биомассе такие металлы как кадмий, цинк и другие загрязнители. Тем не менее, использование таких растений в практических целях ограничено рядом причин. Во-первых, они не культивируются как сельскохозяйственные культуры, поэтому возникают вопросы, связанные с их семеноводством при использовании на значительных площадях. И во-вторых, это сравнительно невысокая биомасса растений, что не позволяет выносить из почв значительные количества загрязнителей, несмотря на высокие коэффициенты их биологического накопления. Отсюда, возникают вопросы экономической эффективности использования тех или иных растений для фиторемедиация [12]. С другой стороны, тяжелые металлы — это элементы, которые в значительной степени нарушают почвенные

экосистемы [2]. Однако существуют и другие проблемы, связанные с загрязнением почв и как следствие поверхностных и подземных вод, требующие своего разрешения, например, эвтрофикация. Проблема эвтрофикации водоемов является актуальной для любой страны и на любом уровне, локальном или региональном, например, для бассейна Балтийского моря [7]. Ключевым фактором эвтрофикации по многолетним данным мониторинга является содержание в воде соединений фосфора, а также азота. Эвтрофикация стимулируется при дополнительном поступлении фосфора в водные объекты источником, которого являются минеральные и органические удобрения [27].

Одновременное решение проблемы загрязнения экологических систем, как тяжелыми металлами, так и биогенными элементами может быть реализовано на основе использования быстрорастущих древесных культур (ивы, тополя, ольхи черной и др.). Быстрорастущие древесные культуры, как правило, используются для посадки энергетических плантаций, биомасса которых, впоследствии используется для целей биоэнергетики. Для этих целей применимы специальные быстрорастущие сорта деревьев и кустарников, ежегодный прирост которых составляет более одного метра [9].

Растения быстрорастущей ивы обеспечивают выход продукции через 3 - 4 года с начала закладки производственной плантации, что в 5 - 7 раз быстрее по сравнению с обычными посадками ольхи, ели или сосны, которые убираются на биомассу через 15 - 20 лет. В западной литературе существует специальный термин для таких плантаций – SCR (short rotation coppice), т.е. короткоцикловые посадки [29]. Среднегодовой урожай может достигать 10 - 15 т сухой древесины с гектара. Однократно заложенная плантация может быть использована для получения 7 урожаев продукции без значительного снижения продуктивности [22].

Целью наших исследований была оценка потенциала фиторемедиации тяжелых металлов и биогенных элементов (фосфор, азот) растениями ивы, которые не обладают выраженными аккумулялирующими способностями, но вследствие быстрого прироста биомассы способны эффективно очищать загрязненные почвы. При этом растения ивы, аккумулялируя ряд тяжелых металлов, особенно на землях с их повышенным содержанием, тем не менее не испытывают значительного отрицательного воздействия [17].

Использование быстрорастущих подвидов ивы в качестве вегетативных фильтров для частичной утилизации сбросных сточных вод так же является перспективным направлением [16]. Эксперименты показали высокую эффективность таких посадок в частности для утилизации азота и фосфора, которые являются основными биогенными загрязнителями водоемов. Кроме того, вегетативные фильтры активно утилизируют из сточных вод тяжелые металлы, особенно кадмий, являющийся опасным канцерогеном.

Материалы и методы. Полевые эксперименты проводились в 2011 - 2015 годах в двух регионах Республики Беларусь: Кричевский район Могилевской области и Дзержинский район Минской области. Почва на

Кричевском экспериментальном участке дерново-подзолистая среднесмытая, развивающаяся на легких лессовидных суглинках. В Дзержинском районе почва опытного участка дерново-подзолистая, легко суглинистая.

Эксперименты проводились с растениями быстрорастущих сортов ивы шведской селекции (сорт "Jorr", *Salix viminalis* L.) и сербско-белорусской селекции (сорта "Волмянка", "Дрина", "Бачка" *Salix alba* L.).

Площадь опытной делянки на экспериментальном участке составляла 25 м². Повторность четырехкратная. Расположение делянок в пределах повторности рендомизированное. Схема посадки растений ленточная двухрядная, с расстоянием между лентами 140 см, между рядами в ленте 70 см и между растениями в ряду 45 см. Густота посадки – 18 - 20 тысяч растений на гектар.

Определение макроэлементов и микроэлементов в почвенных и растительных образцах проводилось на рентген-флуоресцентном анализаторе РФА-СЕР-01. Относительная погрешность измерений не превышала 10 %. Образцы проб почвы и растений предварительно доводились до воздушно-сухого состояния и измельчались.

Полевые эксперименты закладывались согласно методике полевого опыта [1].

Полученные в результате исследований экспериментальные данные обрабатывались с помощью методов дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа на основе статистических программ Exsel, Statistic 22, SigmaPlot 11.2.

Результаты и обсуждение. Согласно результатам мониторинга почвы, г. Кричева являются более загрязненными рядом тяжелых металлов, чем почвы г. Минска или таких промышленных центров, как Солигорск или Жодино. Например, содержание в почве кадмия и свинца близко к предельно допустимой концентрации (ПДК) или ориентировочно допустимой концентрации (ОДК). По-видимому, высокое содержание тяжелых металлов в почвах связано с интенсивной промышленной деятельностью в регионе, в частности, наличием предприятий строительной отрасли, и производства резины.

Для количественной оценки поступления тяжелых металлов из почвы в растения рассчитывались коэффициенты биологического накопления (КБН) - отношение содержание тяжелого металла в единице массы растения (мкг/г) к содержанию тяжелого металла в единице почвы (мкг/г). Измерения проводились в образцах почвы и листьев ивы. Результаты измерения содержания и расчетов коэффициентов биологического накопления ряда тяжелых металлов в листьях ивы представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Среднее содержание валовых форм тяжелых металлов в почве и листьях и коэффициенты их биологического накопления в листьях ивы в 2009 г.

Объект	Содержание тяжелых металлов, мг/кг					
	Cd	Zn	Pb	Cu	Ni	Mn
Почва	2.02±0.35	43.9±4.12	18.46±3.76	9.35±1.19	5.99±0.87	661.76±28.98
Листья	0.12±0.02	141.75±12.92	0.98±0.11	12.55±1.77	0.41±0.04	86.14±9.12
КБН	0.06	3.23	0.05	1.34	0.07	0.13
ПДК, ОДК	2.0	220.0	32.0	132.0	80.0	1500

Измерение содержания тяжелых металлов в листьях, позволяет прогнозировать поступление их непосредственно в древесину, т.е. основную продукцию [5]. Так, установлено, что между накоплением тяжелых металлов в листьях и древесине ивы наблюдается прочная корреляционная зависимость. Этот факт дает возможность использовать данные о накоплении тяжелых металлов в листьях, как показатель для прогнозной оценки накопления тяжелых металлов в древесине.

Результаты наших экспериментов показывают, что коэффициенты биологического накопления таких тяжелых металлов, как Cd, Pb, Ni, Mn из почвы в листья не превышают единицы. Фиторемедиация тяжелых металлов зависит от целого ряда факторов: условий выращивания (полевой или вегетационный эксперимент), физико-химических характеристик почвы, наличия в почве, как измеряемого элемента, так и его аналогов или наоборот антагонистов, вида и сорта ивы и т.д. Содержание кадмия в листьях ивы по данным экспериментов может колебаться в очень широких пределах от 0.08 мг/кг [14] до 55 мг/кг [11]. Одним из основных факторов является уровень загрязнения почвы этим элементом, как естественным путем, например, при выращивании ивы на месте бывших полигонов отходов или отвалов образовавшихся в результате добычи полезных ископаемых [23, 25], так и в вегетационных экспериментах при искусственном загрязнении субстрата [5].

Содержание свинца в листьях ивы может составлять от 0.68 [13] до нескольких десятков миллиграмм на килограмм биомассы [10].

Содержание никеля, по данным литературных источников колебалось от 0.32 [26] до нескольких десятков миллиграмм на килограмм почвы [28] и марганца от 50 [25] и до нескольких сотен [30].

Коэффициент биологического накопления по данным экспериментов для этих элементов в значительной степени варьировал в зависимости от вида ивы и места выращивания. В полевых условиях он, как правило, не превышал 1, но резко увеличивался при росте загрязнения и при высоком уровне загрязнения почв, например при 18 мг/кг по кадмию КБН для этого элемента составлял около 4 единиц [10]. Следует отметить, что максимальный уровень загрязнения по кадмию, например в Сербии не превышал показателя 3 мг/кг и в Польше, вблизи мест разработки полезных ископаемых от 4.6 - 64.0 мг/кг [5].

Содержание меди в листьях, по данным экспериментов колебалось от 3.3 [23] до 223 мг/кг [20] и цинка от 66 до нескольких сотен [28]. Таким образом, результаты наших экспериментов, соответствовали данным других исследований. Тем не менее, стоит отметить, что по содержанию и

коэффициентам биологического накопления таких тяжелых металлов как кадмий, свинец, никель и марганец, полученные нами данные были ближе к минимальным показателям. Это можно объяснить тем фактом, что исследования по содержанию металлов в листьях ивы, как правило, проводятся на сильно загрязненных естественным путем площадях или в специально смоделированных вегетационных экспериментах. Наши результаты, получены на пахотных землях расположенных вблизи промышленных объектов, без дополнительного внесения тяжелых металлов.

Одним из аспектов, который необходимо учитывать при использовании посадок ивы в целях фиторемедиации, является синергизм или антагонизм элементов поступающих в биомассу растений. В условиях Сербии было установлено, что содержание свинца в растениях ивы коррелирует с рядом других тяжелых металлов: железо (коэффициент корреляции 0.4), цинк (коэффициент корреляции 0.317), марганец (коэффициент корреляции -0.342) и никель (коэффициент корреляции -0.503) [5]. Так же существует антагонизм между никелем, кадмием и свинцом, что способствует торможению аккумуляции последних элементов в биомассу ивы. Наличие синергизма или антагонизма элементов поступающих в биомассу клонов ивы отмечается и в исследованиях других авторов [6]. При этом констатируется, что уровень аккумуляции тяжелых металлов при выращивании ивы на одной территории зависит от клонов ивы.

В задачи наших исследований входило определение зависимости перехода тяжелых металлов в биомассу от доз внесения калийных удобрений. Почвы Кричевского района в значительной степени загрязнены радионуклидами и внесение высоких доз калийных удобрений позволяет контролировать поступление ^{137}Cs в биомассу ивы [16]. Поэтому практический интерес представляет определение зависимости поступления тяжелых металлов в растения ивы от доз внесения калийных удобрений, что позволит оценить возможность получения древесины ивы на участках с комплексным загрязнением радионуклидами и тяжелыми металлами. Установлено, что внесение калийных удобрений в разной степени влияет на поступление в биомассу ивы тяжелых металлов.

Наиболее высокий коэффициент детерминации между коэффициентом биологического накопления элемента в листьях ивы и внесением калийных удобрений получен для меди - 0.71 (рис. 1).

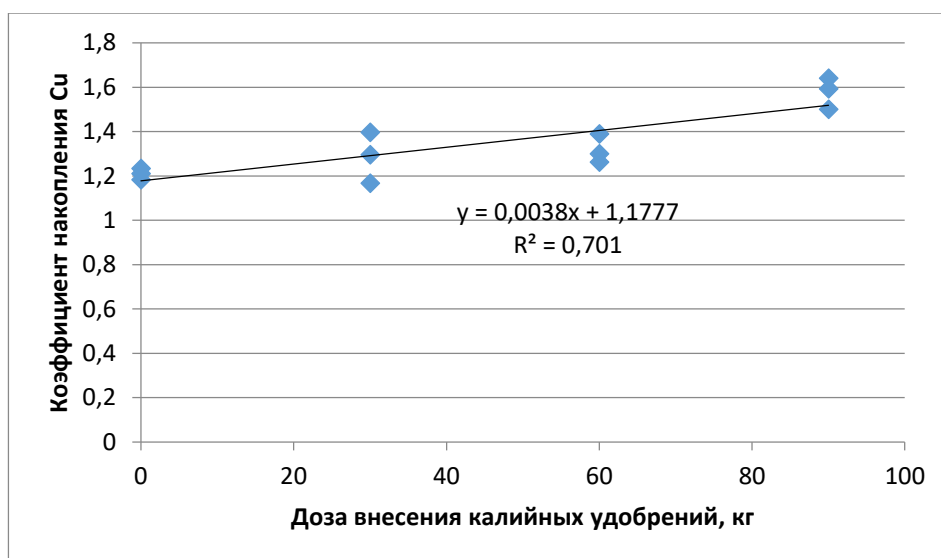


Рисунок 1 – График зависимости коэффициента биологического накопления Cu в листьях ивы от доз внесения калийных удобрений. Клон Jorg

Средняя степень зависимости установлена для марганца (коэффициент детерминации – 0.45) и цинка (коэффициент детерминации – 0.4), что показано на рисунке 2.

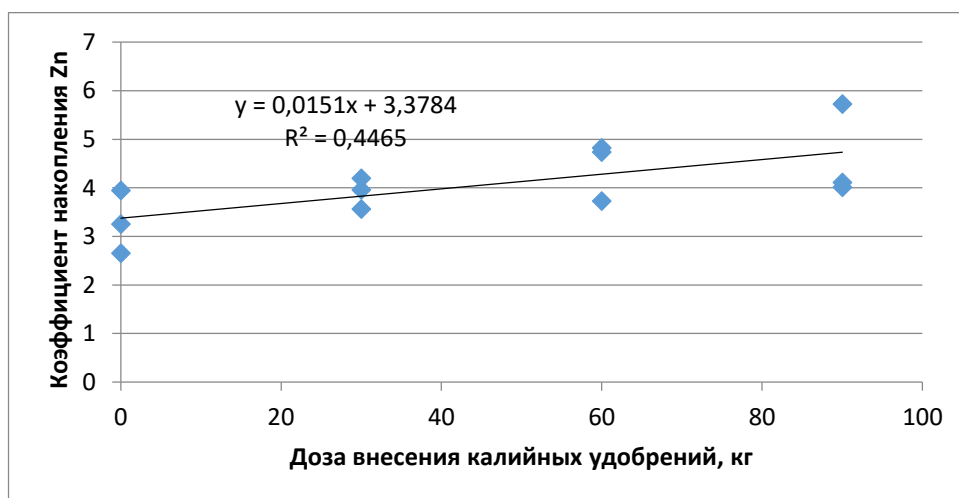


Рисунок 2 – График зависимости коэффициента биологического накопления Zn в листьях ивы от доз внесения калийных удобрений. Клон Jorg

Величина коэффициентов детерминации между накоплением кадмия и свинца, так же как и никеля в листьях ивы и дозами внесения калийных удобрений была незначительной и составила от 0.1 до 0.2.

Одним из эффективных методов контроля эвтрофикации является внедрение специальных вегетативных фильтров на территории водосбора, например, на основе быстрорастущих видов ивы, биомасса которой используется на энергетические цели. Таким образом, биогенные элементы вместе с биомассой выносятся за пределы данного ландшафта, тем самым не поступая в водные объекты. Плантации ивы на энергетические цели

убираются с интервалом один раз в три года и биогенные элементы (азот и фосфор) за этот срок накапливаются в древесине и других частях растения. Содержание общего азота и фосфора в листьях растений ивы измерялось с интервалом в две недели в течение периода вегетации. Установлено, что содержание в листве ивы азота и фосфора изменяется в течение периода вегетации.

Максимальный коэффициент биологического накопления азота характерен для начала вегетации растений ивы, май месяц. В середине периода вегетации, июль-август, наблюдалось снижение интенсивности накопления в листьях ивы азота, и определенный рост этого показателя имел место в сентябре.

Динамика накопления в листьях ивы фосфора имела иной характер. Минимальный коэффициент биологического накопления наблюдался в июне-июле месяце. В августе и сентябре такие показатели как содержание фосфора и коэффициент биологического накопления элемента в листьях ивы имели тенденцию к росту.

Результаты измерения содержания азота и фосфора в древесине ивы (в пересчете на сухое вещество) после двух лет выращивания представлены на рисунке 3.

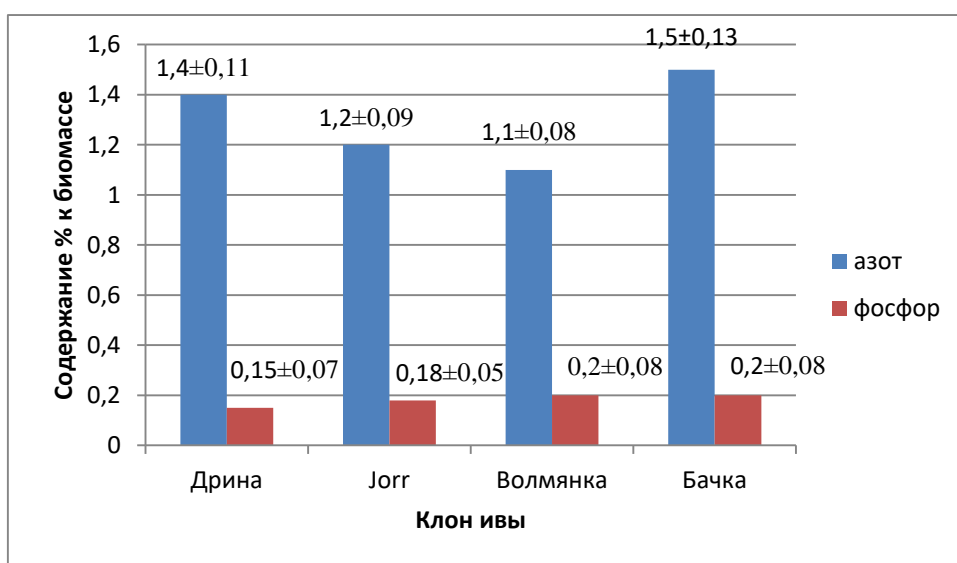


Рисунок 3 - Содержание азота и фосфора в древесине 4 клонов ивы. Возраст растений два года. $\bar{A} \pm S_x$

Было установлено, что содержание *N* (азота) варьирует в стволовой древесине и ветках ивы от 1.1 до 1.5 % и фосфора соответственно от 0.15 % до 0.20 % в зависимости от сорта.

При урожайности древесины ивы достигнутой в наших экспериментах (50 т), влажности древесины при уборке 50 %, и средней по клонам (сортам) величины содержания элемента (0.18 % содержания фосфора к биомассе) величина выноса фосфора с биомассой ивы за три года составит 45.6 кг, азота – 325.7 кг. Часть фосфора (0.67 кг) и азота (4.7 кг) возвратится в экосистему в

конце вегетационного сезона с листьями. Расчеты, выполненные на основе метода балансового моделирования, показали, что, что месячная величина выноса фосфора фосфатного с поверхностным и твердым стоком в водоем, с территории водосбора площадью 16.01 км², изменяется в пределах от 2 до 7.6 кг (0.13 - 0.48 кг/км²) [19].

Таким образом, потенциально плантации ивы позволяют выводить из экологических систем сравнительно большие объемы фосфора относительно выноса элемента с территории водосбора. При этом они могут использоваться в качестве естественных вегетативных фильтров.

Заключение. Использование быстрорастущих клонов ивы для фиторемедиации позволяет выводить из экосистем, как тяжелые металлы, так и биогенные элементы, обуславливающие эвтрофикацию водоемов. Коэффициенты биологического накопления для кадмия, свинца, никеля и марганца в наших экспериментах, заложенных в полевых условиях на умеренно загрязненных почвах, были ниже единицы. С учетом наземной биомассы ивы это позволит аккумулировать незначительное количество этих элементов (около 4 грамм кадмия, 16 никеля и 32 свинца) с гектара в год. Тем не менее, как показывают результаты других экспериментов, при высоком уровне загрязнения почв этими элементами, содержание их в биомассе может быть в десятки раз больше. Годовой вынос марганца с биомассой по результатам наших исследований может составить до 2.5 кг в год. Таким образом, плантации ивы можно эффективно использовать на загрязненных марганцем почвах, в то же время растения не испытывают отрицательного воздействия при умеренном содержании в почве кадмия и свинца. Коэффициенты биологического накопления меди и цинка в экспериментах превышали единицу, что будет иметь положительный эффект для растений, особенно на почвах с невысоким содержанием этих элементов (например, торфяные почвы). Медь и цинк являются необходимыми для жизнедеятельности растений микроэлементами. Дополнительное внесение в почву калия стимулирует накопление меди, в меньшей степени цинка и марганца и практически не оказывает влияние на поступление свинца, никеля и кадмия.

Вынос биогенных элементов фосфора и азота с биомассой ивы составляет соответственно 15.2 и 108.6 кг в год с гектара. Это позволяет позитивно оценивать перспективы использования посадок ивы в качестве вегетативных фильтров для предотвращения эвтрофикации водных объектов.

Список литературы

1. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта / Б.А. Доспехов – М.: Колос, 1985. - 416 с.
2. Родькин О.И. Сельскохозяйственная экология: Учебно-методическое пособие / О.И. Родькин, Т.М. Дайнеко, Л.А. Веремейчик – Минск: БАТУ, 2001. – 191 с.
3. Состояние природной среды Беларуси. Экологический бюллетень 2012 г. / Под ред. В.Ф. Логинова – Минск: БАТУ, 2012. - 375 с.
4. A review of past and current research on short rotation coppice in Ireland and abroad / J. Wickham [et all.] / Report. COFORD and Sustainable Energy Authority of Ireland, 2010. – 44 p.

5. Bert V. et al. Zinc tolerance and accumulation in metallophilous and nonmetallophilous populations of *Arabidopsis halleri* Brassicaceae. *New Phytologist*, 2000, 146, 225 - 233.
6. Borišev M. Phytoextraction of Cd, Ni, and Pb Using Four Willow Clones (*Salix* spp.) / M. Borišev [et al.] // *Polish J. of Environ. Stud.* – 2009. – Vol. 18, No. 4. – P. 553 –561.182.
7. Delplanque M. et al. Combustion of *Salix* used for phytoextraction: The fate of metals and viability of the processes / *Biomass and Bioenergy* 49 (2013).- P. 160-170.
8. *Environmental Science.* – Uppsala : The Baltic University Press, 2003.- 824 p.
9. Escarré J. et al. 2000. Zinc and cadmium hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens* from metalliferous and nonmetalliferous sites in the Mediterranean area: implications for phytoremediation. *New Phytologist*, 2000, no. 145, pp. 429 - 437.
10. Fischer G. Biomass potentials of miscanthus, willow and poplar: results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Asia / *Biomass and Bioenergy* 2005, - 28 – P. 119–132.
11. Jensen Julie K. et al. The potential of willow for remediation of heavy metal polluted calcareous urban soils / *Environmental Pollution* 157 (2009) 931 – 937.
12. Lieven C. et al. Fast pyrolysis of heavy metal contaminated willow: Influence of the plant part / *Fuel*, 2009, 88, pp. 1417 – 1425.
13. Marmioli M. et al. Growth, physiological and molecular traits in Salicaceae trees investigated for phytoremediation of heavy metals and organics. *Tree Physiology*, 2011, no. 31, pp. 1319 - 1334.
14. Mleczek M. et al. Accumulation of selected heavy metals by different genotypes of *Salix* / *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66, pp. 289 – 296.
15. Mleczek M. et al. Cadmium and lead uptake by *Salix viminalis* under modified Ca/Mg ratio / *Ecotoxicology*, 2011, 20, pp. 158 – 165.
16. Mosiej J., Rodzkin A. et al. Biomass Production in Energy Forests / *Ecosystem Health and Sustainable Agriculture.* - Uppsala University, 2012, pp. 196 – 202.
17. Nielsen K.H. Environmental aspects of using waste waters and sludges in energy forestry cultivation / K.H. Nielsen // *Biomass and Bioenergy*, 1994, 6, p. 123 – 32.
18. Pulford I.D. Heavy metal uptake by willow clones from sewage sludge-treated soil: The potential for phytoremediation / *International Journal of Phytoremediation.* — 2002. - vol. 4 (1). – P. 59 – 72.
19. Rodzkin Aleh et al. The Environmental benefit of SCR willow cultivation in agrolandscape for preventing of lakes eutrophication / XIX International Eco-conference 2015. Novi Sad, Serbia, 23-25 September 2015, p. 93 – 101.
20. Salam Mir Md Abdus et al. Effects of contaminated soil on the growth performance of young *Salix* (*Salix schwerinii* E.L. Wolf) and the potential for phytoremediation of heavy metals / *Journal of Environmental Management*, 2016, 183, pp. 467 – 477.
21. Saurabh Sudha Dhiman et al. Phytoremediation of metal-contaminated soils by the hyperaccumulator canola (*Brassica napus* L.) and the use of its biomass for ethanol production // *Fuel*, 2016, 183, pp. 107–114.
22. Sleight Nathan J. Recently bred willow (*Salix* spp.). Biomass crops show stable yield trends over three rotations at two sites / *Bioenerg. New-York*, 2016., Res. 9(3), pp. 782 - 797.
23. Syc Michal et al. Willow trees from heavy metals phytoextraction as energy crops / *Biomass and bioenergy* 2012, 37, pp. 106 – 113.
24. Rascio N., Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 2011, 180, pp. 169-181
25. Van der Ent A, Mulligan D. Multi-element concentrations in plant parts and fluids of Malaysian nickel hyperaccumulator plants and some economic and ecological considerations. *J Chem Ecol* 2015, 41(4), p. 396
26. Vandecasteele Bart et al. Effects of willow stands on heavy metal concentrations and top soil properties of infrastructure spoil landfills and dredged sediment-derived sites / *Science of the Total Environment*, 2009, 407, pp. 5289 – 5297.

27. Vandecasteele Bart et all. Potential of five willow species (*Salix* spp.) for phytoextraction of heavy metals / *Environmental and Experimental Botany* 60 (2007) 57–68
28. Vollenweider R.A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication / R. A. Vollenweider. – *Mem. Ist. Ital. Idrobiol*, 1976, 83 p
29. Wahsha Mohammad et all. Heavy metals accumulation in willows growing on Spolic Technosols from the abandoned Imperina Valley mine in Italy / *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 123, pp. 19 – 24.
30. Yang Weidong et all. Comparison of manganese tolerance and accumulation among 24 *Salix* clones in a hydroponic experiment: Application for phytoremediation / *Journal of Geochemical Exploration* 2015, 149, pp. 1–7.

References

1. Dospikhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Methodology of field experience]. Moscow, 1985, 416 p.
2. Rod'kin O.I. et all. *Sel'skohozyajstvennaya ehkologiya: Uchebno-metodicheskoe posobie* [Agricultural ecology: Educational-methodical manual]. Minsk, 2001, 191 p.
3. *Sostoyaniye prirodnoy sredy Belarusi. Ekologicheskiy byulleten'* [The state of the natural environment of Belarus. Environmental Bulletin]. Minsk, 2012, 375 p.

Сведения об авторе

Родькин Олег Иванович – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии. Белорусский национальный технический Университет (Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, тел. 375 293871501, e-mail: aleh.rodzkin@rambler.ru).

Information about author

Rodkin Oleg I. – Candidate of Biological Sciences, Ass. Prof. of the Ecology Department. Belarusian National Technical University (220013, Nezavisimosty str., 65 Minsk Republic of Belarus, tel. 375 293871501, e-mail: aleh.rodzkin@rambler.ru).