

УДК 574:539.1.04

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ДЛЯ ДЕЗАКТИВАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИЙ

О. И. РОДЬКИН¹⁾, Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Загрязнение почв радионуклидами, основной причиной которого является авария на Чернобыльской атомной станции, является одним из наиболее опасных негативных факторов воздействия на окружающую среду. Эффективный метод для дезактивации загрязненных радионуклидами территорий – фиторемедиация, одним из направлений которой является выращивание «энергетических» культур. Преимущество такого подхода – возможность использования биомассы как возобновляемого источника зеленой энергии в сочетании с постепенной рекультивацией загрязненных почв. Перспективной для целей фиторемедиации культурой является ива, быстрорастущие виды которой обеспечивают высокий урожай биомассы с производственной плантации. Проблемный вопрос – безопасное использование полученной биомассы. Оценка условий перехода радиоактивного цезия в биомассу ивы проводилась на загрязненных после аварии на ЧАЭС территориях Беларуси. Эксперименты свидетельствуют, что прогнозируемое содержание ¹³⁷Cs в древесине быстрорастущей ивы значительно ниже уровня по нормативам допустимого для древесного топлива, установленным для Республики Беларусь (740 Бк/кг). При уровне загрязнения почв, при котором они выводятся из сельскохозяйственного использования (40 Ки/км²), прогнозируемое содержание ¹³⁷Cs в древесине составит от 35 до 120 Бк/кг (в зависимости от дозы внесения калийных удобрений).

Ключевые слова: фиторемедиация; радионуклиды; энергетические культуры; биотопливо.

PROSPECTS FOR USING THE PHYTOREMEDIATION METHOD FOR DEACTIVATION OF TERRITORIES CONTAMINATED WITH RADIONUCLIDES

A. I. RODZKIN^a, N. N. TSHYBULKO^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daïhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: A. I. Rodzkin (aleh.rodzkin@rambler.ru)

Soil contamination with radionuclides, the main cause of which is the accident at the Chernobyl nuclear power plant, is one of the most dangerous negative environment impact factors. Phytoremediation including cultivation of «energy» crops is an effective method for decontamination of territories contaminated with radionuclides. The advantage of this approach

Образец цитирования:

Родькин ОИ, Цыбулько НН. Перспективы использования метода фиторемедиации для дезактивации загрязненных радионуклидами территорий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;1:42–50.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-42-50>

For citation:

Rodzkin AI, Tshybulko NN. Prospects for using the phytoremediation method for deactivation of territories contaminated with radionuclides. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;1:42–50. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-1-42-50>

Авторы:

Олег Иванович Родькин – доктор биологических наук, доцент; заместитель директора по учебной работе.
Николай Николаевич Цыбулько – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; начальник научно-исследовательского сектора.

Authors:

Aleh I. Rodzkin, doctor of science (biology), docent; deputy director for educational work.
aleh.rodzkin@rambler.ru
Mikalai M. Tsybulka, doctor of science (agriculture); full professor; head of the research center.
nik.nik1966@tut.by

is the possibility of using biomass as a renewable source of green energy in combination with the gradual reclamation of polluted soils. A promising crop for the purposes of phytoremediation is willow, the fast-growing species of which provide a high yield of biomass from a production plantation. A problematic issue is the safe use of willow biomass. The assessment of the conditions for the transition of radioactive cesium into willow biomass was carried out on the territories of Belarus contaminated after the Chernobyl accident. Experiments have shown that the predicted content of ^{137}Cs in the wood of a fast-growing willow is significantly lower than the level allowed for wood fuel according to the standards established for the Republic of Belarus (740 Bq/kg). Even at the level of soil pollution at which they are removed from agricultural use (40 Ci/km²), the content of ^{137}Cs in wood will be from 35 to 120 Bq/kg (depending on the dose of potash fertilizers).

Keywords: phytoremediation; radionuclides; energy crops; biofuels.

Введение

Загрязнение радионуклидами является одним из наиболее опасных негативных факторов воздействия на почвенные и прилегающие к ним экосистемы. Можно выделить ряд основных причин радиоактивного загрязнения земель, которые вызваны антропогенным воздействием. Наиболее масштабное загрязнение в истории связано с аварией на Чернобыльской атомной станции 26 апреля 1986 г. [1]. Негативные последствия Чернобыльской аварии в той или иной степени наблюдались в десятках стран. Конечно, в наибольшей степени пострадали территории тех стран, которые расположены в непосредственной близости от Чернобыля. Это Украина, где непосредственно располагается атомная станция, Российская Федерация и Республика Беларусь, на территорию которой выпал наиболее значительный объем радионуклидов. В результате зона радиоактивного загрязнения охватывает 23 % территории страны, в том числе 1,0 млн га сельскохозяйственных и 1,6 млн га лесных земель [2; 3]. В Беларуси после аварии на Чернобыльской АЭС основная площадь загрязнения обусловлена выпадением радионуклидов со следующим периодом полураспада: цезий-137 – 30 лет и стронций-90 – 29 лет. Из сельскохозяйственного оборота выведены земли с плотностью загрязнения цезием-137 свыше 40 Ки/км², стронцием-90 свыше 3 Ки/км². Самоочищение почвы за счет перемещения и естественного распада радионуклидов происходит достаточно медленно¹. Ежегодное снижение их содержания в верхнем 5-сантиметровом слое почвы составляет примерно 5–10 %, а в нижележащих слоях 1–2 %.

Последствия катастрофы на ЧАЭС носят глобальный характер, результатом которой является радиоактивное загрязнение территорий не только Республики Беларусь и Украины, но и ряда других стран. Так, выпадение радиоактивных осадков, образовавшихся после взрыва на ЧАЭС, на территорию Сербии вызвали увеличение плотности загрязнения ^{137}Cs в ряде регионов страны более чем в 10 раз, с 15,5 до 236 Бк/кг⁻¹ [4].

Методы дезактивации загрязненных радионуклидами территорий можно разделить на следующие виды: механические, физические (безреагентный), физико-химические (с применением реагентов), электрокинетические и биологические [5]. Механические и химические способы дезактивации обладают серьезными недостатками: они снижают плодородие почв, либо ухудшают их физические и химические свойства [6]. С этой точки зрения, значительные перспективы имеют биологические методы дезактивации², к которым относится фиторемедиация [7].

Название метода происходит от греческого «фитон» (растение) и латинского «ремедиум» (восстанавливать). Он основан на том, что многие виды растений способны накапливать загрязнители в биомассе и в результате их содержание в тканях и органах растений может в десятки и даже сотни раз превышать содержание в окружающей среде (почве). Соответственно, состояние окружающей среды будет постепенно улучшаться, и способность почв к воспроизводству хозяйственно-полезной продукции восстанавливаться. Скорость восстановления будет тем выше, чем быстрее растение способно аккумулировать загрязнители. В настоящее время методы фиторемедиации можно использовать для восстановления почв загрязненных свинцом, кадмием, ртутью и другими тяжелыми металлами, мышьяком, органическими загрязнителями, радионуклидами и т. д. [8].

Принципиально важным фактором для фиторемедиации является возможность дальнейшего безопасного использования или утилизации биомассы. Так, одним из направлений является фитоэкстракция, которая предусматривает использование растений гипер-аккумуляторов, способных быстро и в высоких концентрациях накапливать загрязнители в биомассе [9]. В этой случае биомасса может не только утилизироваться или сжигаться, но и поступать на переработку с целью извлечения ценного сырья, например, меди, никеля и других металлов. Более того, зола, которая образуется при сжигании,

¹Агеец В. Ю. Система мер снижения поступления радионуклидов в урожай – основа реабилитации загрязненных территорий Беларуси: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук : 06.01: Акад. аграр. наук Респ. Беларусь, Ин-т почвоведения и агрохимии. Минск, 2001.

²Экопортал. Технология фиторемедиации [Электронный ресурс]. URL: <https://ecportal.su/public/industry/view/1175.html> (дата обращения: 15.01.2023).

может быть также использована как вторичное сырье. Такой подход требует применения высокотехнологичных методов для экстракции полезных элементов из биомассы с учетом экономической рентабельности, что является трудноосуществимым на практике. Так, в целях фиторемедиации используют растения с высокой сорбционной способностью, в том числе амарант и бобовые травы. Как показывают результаты экспериментов, посев таких культур позволяет ежегодно снижать содержание в почве тяжелых металлов или радиоактивных элементов (стронций, цезий, торий) [10; 11]. Но при этом биомасса просто утилизируется вследствие высокого уровня загрязнения.

Хороший потенциал в качестве растений гипер-аккумуляторов имеют растения семейства крестоцветных как дикорастущих, так и культурных видов [9]. В этом случае опять же остается вопрос эффективного использования загрязненной биомассы. Очевидно, что культурные овощные растения, например капуста, не могут применяться в качестве продуктов питания, если они выращены на загрязненной территории. Достаточно эффективным накопителем ^{137}Cs являются рапс и подсолнечник. Но дальнейшее использование полученного из их семян масла может быть для технических, но не пищевых целей. Также для продовольственных целей нельзя использовать бобы фасоли, выращенной на загрязненных радионуклидами территориях, хотя это растение также имеет потенциал по накоплению ^{137}Cs . В качестве растения аккумулятора потенциально можно рассматривать ряд видов злаковых трав, например, щирца колосистая. Но использование такой биомассы на кормовые цели увеличивает риск накопления радионуклида в животноводческой продукции. Те же проблемы возникают при выращивании на загрязненных землях однолетних кустарников, например, летнего кипариса [9]. Одним из вариантов использования растений накопителей, особенно бобовых трав (клевер, люцерна) является запашка биомассы [10]. Такой подход позволяет улучшить плодородие почв³, но эффективность дезактивации земель снижается, так как часть загрязненной радионуклидами биомассы возвращается в агроэкосистему.

Таким образом, при оценке эффективности фиторемедиации надо учитывать ряд экологических и экономических факторов. Активная аккумуляция загрязнителя и высокий уровень его содержания в биомассе в сочетании с интенсивным ростом культуры обеспечит быстрые темпы дезактивации почв. Но если биомассу нельзя использовать, поскольку экологически целесообразная утилизация сопряжена с дополнительными экономическими затратами. В противном случае, например, при запашке биомассы ее захоронении на полигонах или сжигании речь идет только о перераспределении радионуклидов в экосистемах.

В связи с этим более целесообразным и широко используемым является второе направление фиторемедиации, сфокусированное на постепенной рекультивации почв и очистке их от металлоидов, нефтяных углеводородов, остатков пестицидов, радионуклидов и ряда промышленных побочных продуктов. Эти загрязнители сложно извлечь для дальнейшего использования в качестве вторичных материальных ресурсов. Возможность безопасного использования биомассы определяется целевым назначением продукции (продукты питания, корма, препараты) и уровнем содержания в ней радионуклидов. С этой точки зрения, относительно невысокая скорость аккумуляции радионуклидов в продукции позволяет менее интенсивно, но неуклонно дезактивировать почву и использовать выращенную биомассу. Одним из направлений, отвечающих таким требованиям, является выращивание «энергетических» культур, биомасса которых может быть использована как возобновляемый источник для производства зеленой энергии.

Термин энергетические культуры включает травы, деревья и кустарники, выращиваемые для энергетических нужд. Такие культуры характеризуются значительной биомассой и высокими темпами роста. Среди травянистых культур потенциал для фиторемедиации имеют как культурные виды (мискантус), так и тростник и другие виды естественной болотной растительности [12–14]. С 1970-х гг. проводятся активные исследования по оценке эффективности использования быстрорастущих подвидов и гибридов древесных растений (ивы, тополя, осины и др.). Плантации быстрорастущих древесных культур имеются практически во всех странах ЕС, а также США и Канаде [15–18]. В западной литературе существует специальный термин для таких плантаций – SRC (short rotation coppice). Они обеспечивают максимально эффективный выход биотоплива на 3–4 год с начала закладки производственной плантации. Быстрые темпы роста возможны при селекции и использовании специальных быстрорастущих сортов или клонов. Короткоцикловые посадки древесных культур главным образом используют для получения биотоплива для возобновляемой энергетики.

Возможность использования короткоциклового плантаций древесных культур для целей фиторемедиации обуславливается быстрыми темпами роста и, соответственно, накопления биомассы, а также тем, что однократно заложенная плантация может расти на том же месте более 20 лет не теряя продуктивности, при этом уборка биомассы осуществляется каждые 3–4 года. Следовательно, перераспределение

³Щур А. В. Экологические подходы к оптимизации состава почвенного микробиоценоза как основа поддержания стабильной производительной способности агроэкосистем: автореф. дис ... д-ра биол. наук, 03.02.08 – экология (биология). Владимир, 2016.

радионуклидов в другие экосистемы за этот период будет минимальным. Остается проблема безопасного использования биомассы. Результаты исследования данного вопроса представлены в публикации.

Материалы и методы исследования

Для оценки уровня и условий накопления радионуклидов в биомассе быстрорастущих древесных культур была заложена экспериментальная плантация ивы в Кричевском р-не Могилевской обл. Выбор ивы как объекта исследований объясняется пластичностью растения и способностью произрастать в условиях повышенной увлажненности и на почвах, характеризующихся низким уровнем плодородия, а также наиболее высокой продуктивностью по сравнению с другими энергетическими культурами в условиях Республики Беларусь.

Полевые опыты заложены на территории загрязненной радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС [19]. Загрязнение территорий в зоне проведения полевого эксперимента обуславливается выпадением ^{137}Cs с радиоактивными осадками в постчернобыльский период.

Плотность загрязнения почв ^{137}Cs на опытных участках составляла от 5 до 10 Ки/км² или от 185 до 370 Бк/м². Другие радионуклиды, например, ^{90}Sr на данной территории присутствуют в незначительных количествах. Поэтому в наших экспериментах определялось накопление в биомассе ивы ^{137}Cs .

Техника закладки и проведения полевых опытов проводилась согласно методике полевого опыта [20].

Площадь опытной делянки составляла 25 м². Повторность четырехкратная. Расположение делянок в пределах повторности рендомизированное. Способ размещения повторений на опытном участке – сплошной с расположением в четыре ряда (яруса). Расстояние между опытными делянками составляло 1,4 м, между ярусами – 1 м. Схема посадки растений ленточная двухрядная, с расстоянием между лентами 140 см, между рядами в ленте 70 см и между растениями в ряду 45 см.

Определение ^{137}Cs в почвенных и растительных образцах проводили на полупроводниковом гамма-спектрометре ADCAM-100. Для количественной оценки поступления ^{137}Cs из почвы в растения определяли коэффициенты перехода (КП), под которыми понимается отношение удельной активности радионуклида в сухой (или с естественной влажностью) массе растительного материала к активности радионуклида на единицу площади поверхности почвы (плотность загрязнения или запас радионуклида).

Результаты исследования и их обсуждение

Одним из условий возделывания сельскохозяйственных культур на почвах, загрязненных радионуклидами, является получение растениеводческой продукции, соответствующей по содержанию радионуклидов нормативным требованиям (РДУ-99)⁴. Возделывание быстрорастущих энергетических культур, в том числе ивы, на загрязненных радионуклидами территориях, является альтернативным производству традиционной сельскохозяйственной продукции подходом. Возможность возделывания ивы на загрязненных радионуклидами территориях определяется принятым в республике допустимым уровнем содержания цезия-137 (РДУ /ЛХ-2001) в древесном топливе, не превышающем 740 Бк/кг⁵.

Для прогнозирования возможности получения нормативно чистой древесины ивы на загрязненных радионуклидами территориях необходим анализ уровня накопления радионуклидов и коэффициентов их перехода в системе «почва – растение». В соответствии с литературными данными, радионуклиды распределяются в органах растений неравномерно [21]. Основное количество радионуклидов концентрируется в корнях, и минимальное в генеративных органах растений. Накопление радионуклидов зависит от расположения, типа и мощности корневой системы. Растения с корневой системой, расположенной в верхних слоях почвы, к которым относится ива, накапливают больше радионуклидов, чем растения со стержневой системой, которая проникает в более глубокие и относительно «чистые» почвенные горизонты. Оценка поступления ^{137}Cs для отдельных частей растения необходима для агротехнического и экологического обоснования возделывания ивы с учетом возможности использования древесины в качестве биотоплива. Согласно технологии возделывания, плантации ивы остаются на одном месте 20–25 лет. Древесина ивы как биотопливо убирается раз в 3–4 года, листья и часть боковых побегов возвращаются в почву. Таким образом, для расчета баланса, прогнозирования и моделирования передвижения ^{137}Cs в системе «почва – растение», необходимо знать его содержание в каждой из частей биомассы.

⁴Цыбулько Н. Н. и др. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Минск, 2012.

⁵Об утверждении гигиенических нормативов «Республиканские допустимые уровни содержания цезия-137 в древесине, продукции из древесины и древесных материалов и прочей пищевой продукции лесного хозяйства (РДУ/ЛХ-2001)»: [Электронный ресурс]. Постановление Гл. гос. санитар. врача Респ. Беларусь, 11 янв. 2001 г., № 4. URL: https://radbez.bsmu.by/library/GN_2.6.1.10-1-01-2001.pdf (дата обращения: 15.01.2023).

Одним из эффективных методов, препятствующих накоплению ^{137}Cs в продукции, является внесение минеральных, прежде всего, калийных удобрений. Цезий, как элемент первой группы периодической таблицы, является химическим аналогом калия и от баланса этих элементов в почве зависит аккумуляция ^{137}Cs растениями. При этом происходит увеличение концентрации обменных катионов в почве, что приводит к усилению антагонизма между радионуклидами и внесенными катионами, уменьшению подвижности радионуклидов, повышению биомассы растений за счет оптимального минерального питания⁶. Известно, что внесение высоких доз калийных удобрений является эффективным приемом, ограничивающим поступление ^{137}Cs в растения⁷. В связи с этим в наших экспериментах изучалось влияние внесения различных доз калия на поступление ^{137}Cs в биомассу ивы.

Результаты расчета коэффициентов перехода ^{137}Cs в биомассу ивы в зависимости от доз внесения удобрений представлены в таблице.

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в фитомассу растений сорта *Jorr Salix viminalis*, $\text{K}_i \times 10^{-3} \text{ м}^2\text{кг}^{-1}$

Transferring coefficient ^{137}Cs in phytomass of plants *Jorr* variety *Salix viminalis*, $\text{K}_i \times 10^{-3} \text{ м}^2\text{кг}^{-1}$

Вариант	КП, $\text{K}_i \times 10^{-3} \text{ м}^2\text{кг}^{-1}$.			
	Листья	Древесина	Корни	Ветви
Контроль	0,052	0,031	0,939	0,061
$\text{N}_{30}\text{P}_{60}\text{K}_{30}$	0,045	0,025	0,612	0,047
K_{30}	0,051	0,024	0,564*	0,042
K_{60}	0,041*	0,015*	0,393*	0,026*
K_{90}	0,032*	0,009*	0,229*	0,019*
N_{30}	0,048	0,028	0,693	0,055
N_{60}	0,052	0,030	0,634	0,052
HCP_{05}	0,011	0,010	0,337	0,021

Примечание. *Статистически значимые по наименьшей существенной разнице (НСР) различия с контролем при $p < 0,05$.

В результате исследований установлено снижение коэффициента перехода ^{137}Cs (КП) в фитомассу растений ивы на фоне внесения калийных удобрений, наиболее значительное в вариантах с использованием их средней и высокой доз. Удобрения вносились однократно перед посадкой ивы. Как следует из представленных данных, достоверная разница по величине коэффициента перехода ^{137}Cs как в древесину, так и корни растений ивы имела место в вариантах с дозами внесения калия 60 и 90 кг/га. Для азота подобных тенденций не наблюдалось, разница коэффициентов перехода ^{137}Cs в растения на контрольном варианте и вариантах с различными дозами внесения азота была в пределах достоверности. Коэффициенты перехода ^{137}Cs во втором варианте опыта в сравнении с третьим вариантом статистически не отличались для корней, листьев и древесины. На втором и третьем вариантах опыта вносились одинаковые дозы калия (30 кг/га) и разные дозы фосфора и азота. Положительного эффекта от внесения этих элементов при одинаковых дозах калия, на накопление ^{137}Cs в биомассу ивы установлено не было [22].

По полученным данным были построены уравнения зависимости накопления радиоактивного цезия для корней, листьев, древесины и ветви (боковые побеги) от норм внесения калия, как основного фактора, снижающего поступление ^{137}Cs в растения ивы [23; 24].

По результатам трехлетних экспериментов были построены графики зависимости коэффициентов перехода ^{137}Cs в древесину и корни ивы от доз внесения калийных удобрений от 0 до 90 кг/га (рис. 1, 2).

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в древесину ивы изменялись от величины $0,005 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$ до $0,042 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$, в зависимости от доз внесения калийных удобрений. Установлено, что при внесении калийных удобрений в дозе 90 кг/га, величина поступления ^{137}Cs в древесину ивы уменьшается в 3 раза. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в корни ивы более чем в двадцать раз превышали коэффициенты перехода радионуклида в древесину. Внесение калийных удобрений в дозе 90 кг/га снижало коэффициент перехода ^{137}Cs в корни приблизительно в четыре раза.

⁶Цыбулько Н. Н. и др. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Минск, 2012.

⁷Там же.

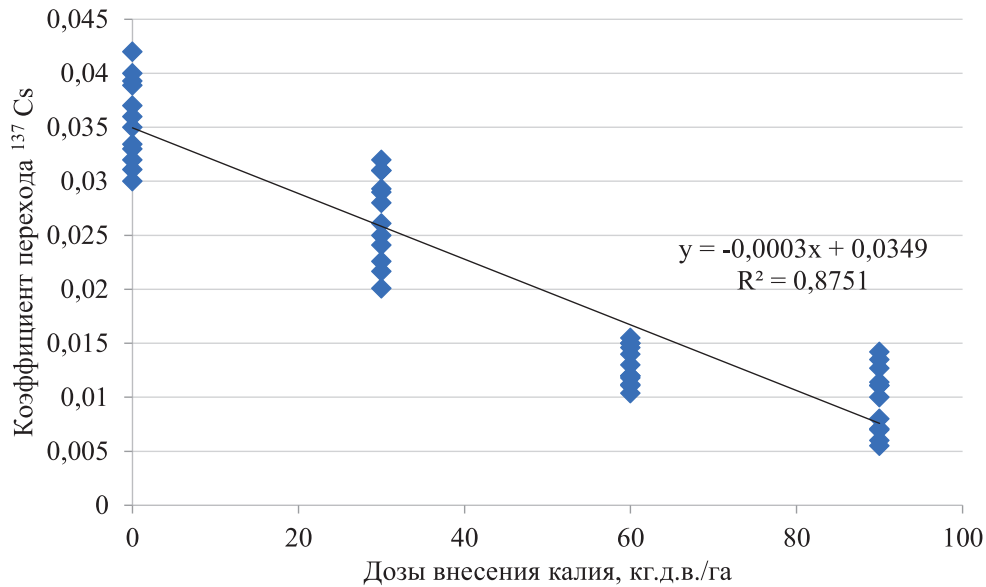


Рис. 1. Зависимость коэффициента перехода ¹³⁷Cs в древесину ивы от доз внесения калийных удобрений на примере сорта *Jorr Salix viminalis*

Fig. 1. Transferring coefficient ¹³⁷Cs in willow wood in depends of rates of potassium fertilizer application on example of *Jorr* variety *Salix viminalis*

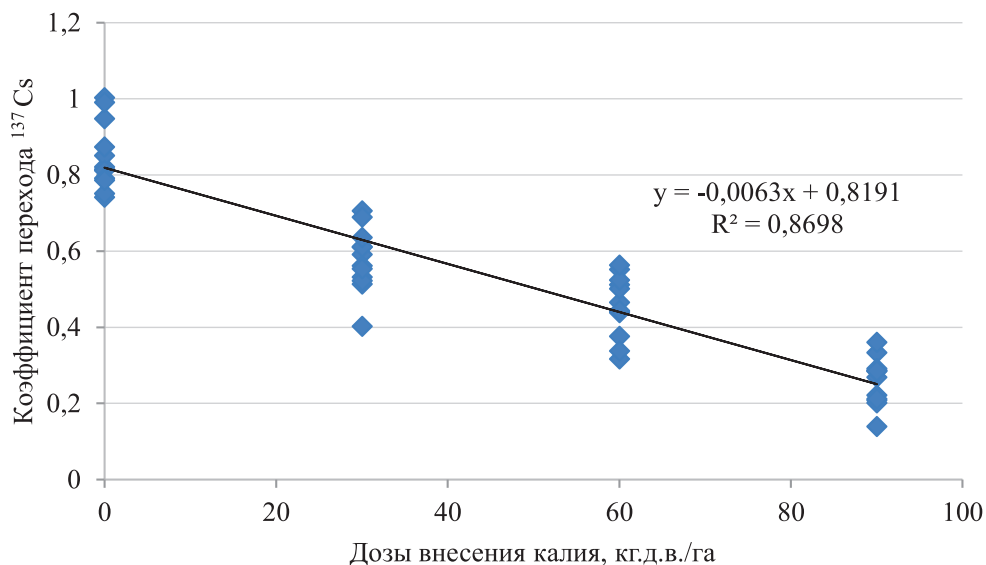


Рис. 2. Зависимость коэффициента перехода ¹³⁷Cs в корни ивы от доз внесения калийных удобрений на примере сорта *Jorr Salix viminalis*

Fig. 2. Transferring coefficient ¹³⁷Cs in willow root in depends of rates of potassium fertilizer application on example of *Jorr* variety *Salix viminalis*

В наших экспериментах наиболее высокий коэффициент перехода ¹³⁷Cs был характерен для корней ивы ($0,229 - 0,939 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$) и листьев ($0,032 - 0,052 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$), и самый низкий для древесины ($0,009 - 0,031 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$). Похожие результаты были получены в экспериментах шведских исследователей [28]. Для корней и листьев коэффициенты перехода ¹³⁷Cs были выше, чем для древесины (стеблей), и варьировали от $0,1 \times 10^{-3}$ до $2,6 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ кг}^{-1}$. В Швеции плотность загрязнения почв экспериментального участка составила около 141 кБк/м^2 , что ниже, чем в Кричевском р-не. Отличие результатов можно также объяснить разницей гранулометрического состава почв: песчаные в Швеции и легкосуглинистые в Беларуси. Коэффициенты перехода ¹³⁷Cs для других культур для песчаных почв также выше по сравнению с суглинистыми⁸.

⁸Цыбулько Н. Н. и др. Рекомендации по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2012–2016 годы. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Минск, 2012.

По результатам других экспериментов, также в Швеции установлено, что активность ^{137}Cs в различных органах растений ранжируется по степени снижения: корни > листья > проростки > древесина (стебли) [27]. При этом коэффициенты перехода были ниже и сопоставимы с данными наших экспериментов.

Для оценки перспективы внедрения плантаций быстрорастущей ивы на загрязненных радионуклидами территориях необходим прогнозный анализ накопления ^{137}Cs и коэффициентов его перехода за весь срок эксплуатации плантации, то есть 20–25 лет. С этой целью на основании экспериментальных данных были разработаны прогнозные модели изменения удельной активности древесины и корней ивы в течение двадцати одного года в зависимости от плотности загрязнения почвы и при трехлетнем цикле уборке древесины.

При моделировании учитывались следующие аспекты:

- плотность загрязнения почвы;
- период полураспада ^{137}Cs ;
- урожай биомассы;
- коэффициенты перехода ^{137}Cs в биомассу ивы в зависимости от доз внесения калия.

Модель изменения удельной активности древесины при плотности загрязнения ^{137}Cs , соответствующей среднему показателю для экспериментального участка, расположенного в Кричевском р-не Могилевской обл., представлена на рис. 3. Максимальный срок эксплуатации плантации рассчитывался на семь периодов уборки без учета первого года закладки плантации, то есть 22 года.

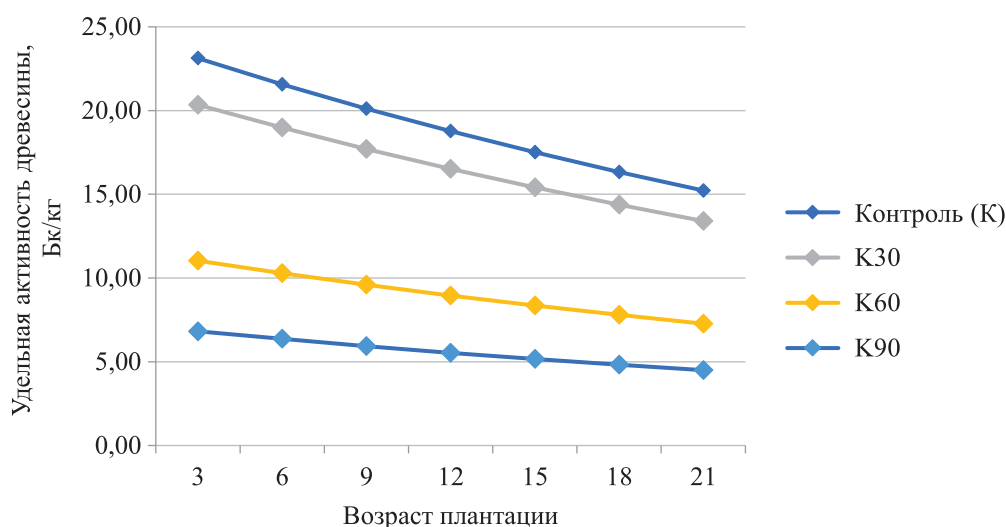


Рис. 3. Прогнозная модель изменения удельной радиоактивности древесины сорта *Jorr Salix viminalis* в зависимости от плотности загрязнения дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы на фоне внесения калийных удобрений

Fig. 3. Model of wood radioactivity of *Jorr* variety *Salix viminalis* variation in depends of level of soddy-podzolic medium loamy soil pollution with application of potassium fertilizer

Как следует из полученных трендов, прогнозируемое накопление радионуклида в древесине было значительно ниже уровня, допустимого по нормативам Республики Беларусь. По результатам моделирования даже при высоком уровне загрязнения (40 Ки/км^2), когда земли не должны использоваться для сельскохозяйственного производства и выводятся из оборота, содержание радионуклида в древесине будет значительно ниже допустимого (от 35 до 120 Бк/кг, в зависимости от дозы внесения калийных удобрений). Таким образом, можно прогнозировать, что даже при минимальной дозе внесения калия содержание радионуклида в древесине ивы не превысит допустимого нормативами показателя, и она может быть использована в качестве возобновляемого источника энергии. Удельная активность ^{137}Cs в золе полученной после сжигания древесины ивы на экспериментальном участке без внесения минеральных удобрений составила 198,5 Бк/кг с погрешностью 5,1% [27]. В Республике Беларусь содержание ^{137}Cs в золе не нормируется.

Заключение

Загрязнение радионуклидами является одним из наиболее опасных негативных факторов воздействия на почвенные и прилегающие к ним экосистемы. Преимущество фиторемедиации как метода дезактивации загрязненных земель определяется возможностью поддержания (улучшения) плодородия почв, относительно невысокими затратами и постепенным снижением уровня содержания радионуклидов. При оценке эффективности фиторемедиации необходимо учитывать, что интенсивная аккумуляция радионуклидов

растениями обеспечит быстрые темпы дезактивации почв, но экологически целесообразная утилизация полученной биомассы сопряжена с дополнительными экономическими затратами. Поэтому более целесообразным является направление фиторемедиации, сфокусированное на постепенной рекультивации и очистке почв от радионуклидов с одновременным использованием биомассы на технические цели, в том числе производство энергии. Наши эксперименты свидетельствуют, что прогнозируемое накопление ^{137}Cs в древесине быстрорастущей ивы значительно ниже уровня, допустимого по нормативам Республики Беларусь, даже при высоком уровне загрязнения почв (до 40 Ки/км²), когда они не должны использоваться для сельскохозяйственного производства и выводятся из хозяйственного оборота.

При этом необходимо учитывать:

- основным фактором снижения поступления ^{137}Cs в биомассу ивы является внесение повышенных доз калийных удобрений;
- коэффициент перехода ^{137}Cs в корни растений ивы в 25 раз превышает его величину для древесины и в 16 раз для листьев;
- в соответствии с технологией возделывания растений ивы на энергетические цели, плантация располагается на одном месте более чем на 20 лет и, как следствие, ^{137}Cs частично аккумулируется в корнях растений на весь этот срок, не попадая в окружающую среду;
- удельная активность ^{137}Cs в золе, полученной после сжигания древесины ивы на экспериментальном участке без внесения минеральных удобрений, составила 198,5 Бк/кг, поэтому дополнительные мероприятия для ее захоронения не требуются. Зола может быть использована в качестве удобрения для энергетических плантаций ивы и других целей.

Библиографические ссылки

1. Люцко АМ, Ролевич ИВ, Тернов ВИ. *Чернобыль: шанс выжить*. Минск: Полымя; 1996.
2. Цыбулько НН. Радиоактивное загрязнение территории Беларуси: динамика и современное состояние. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2012;1:80–84.
3. Чернуха ГА, Лазаревич НВ, Лаломова ТВ. Радиационная безопасность. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; 2005.
4. Djelic G, Krstic D, Stajic J, et al. Transfer factors of natural radionuclides and ^{137}Cs from soil to plants used in traditional medicine in central Serbia. *Journal of Environmental Radioactivity* 2016;158–159:81–88.
5. Минюк ЗП, Шароваров ГА. Современные методы очистки загрязненных территорий. *Вестник МДУ имя А. А. Куляшова*. 2008;2,3(30):173–178.
6. Александрова ЖН. Методика оценки перспектив фиторемедиации радиоактивно загрязненных почв. *Вестник НЯЦ РК*. 2018;4:79–82.
7. Митаев МИ, Джантаева МБ. Фиторемедиация загрязненных почв на урбанизированных территориях (на примере г. Грозный). *Известия чеченского государственного университета*. 2018;3(11):64–68.
8. Демин АВ, Рыбальченко ИВ, Милькина ИВ. Технологии устойчивого развития территорий: фиторемедиация как инновационный метод санации депрессивных территорий. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Государственное и муниципальное управление*. 2022;9(2).124–136. <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2022-9-2-124-136>
9. Киреева НА, Григориади АС, Багаутдинов ФЯ. Фиторемедиация как способ очищения почв, загрязненных тяжелыми металлами. *Теоретическая и прикладная экология*. 2011;3:4–9.
10. Бекузарова СА, Ханиева ИМ, Азубеков ЛХ. Фиторемедиация токсических почв. *Успехи современного естествознания*. 2018;12:345–352.
11. Гурина ИВ и др. *Агроэкологическое обоснование ведения сельскохозяйственного производства на мелиорируемых длительно используемых, нарушенных и загрязненных землях*. Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ; 2014.
12. Муратова АЮ и др. Физиолого-биохимические реакции *Miscanthus* × *giganteus* на загрязнение почвы тяжелыми металлами. *Экобиотех*. 2019;2(4):482–493.
13. Rodzkin A, Kundas S, Charnenak Y. The assessment of cost of biomass from post-mining peaty lands for pellet fabrication. *Environmental and Climate Technologies*. 2018;22(1):118–131.
14. Kundas S, Wichtman W, Rodzkin A. Use of biomass from wet peatland for energy purpose. International and renewable energy sources as alternative primary energy sources in the region: 8 International science conference. Lviv: [publisher unknown]; 2015. p. 77–81.
15. Dimitriou I, Aronsson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005;56(221):47–50.
16. Tuck G, et al. The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate. *Biomass and Bioenergy*. 2006;30(3):183–197.
17. Stern, WB. Stroh als Quelle erneuerbarer Energie. *Swiss Bulletin für angewandte Geologie*. 2010;15(1):95–103.
18. Mola-Yudego B, et al. Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast-growing plantations. *Biofuels*. 2017;8(4):401–410.
19. Богдевич ИМ, и др. *Земля Беларуси. 2001*. Минск: БЕЛНИЦЗЕМ; 2002.
20. Доспехов БА. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Москва: Агропромиздат; 1985.
21. Анненков БН, Юдинцева ЕВ. *Основы сельскохозяйственной радиоэкологии*. Москва: Агропромиздат; 1991.
22. Oljača R, Rodzkin O, Krstić B. *Fiziologija vrba = Willow physiology*. Laktaši: University Banja Luka; 2017.
23. Rodzkin AI, Ivanykovich VA, Pronko SK. Willow wood production on radionuclide polluted areas. *Matica Srpska = Journal for Natural Sciences*. 2010;119:105–113.

24. Rodzkin A, Khroustalev B, Kundas S. Potential of Energy Willow Plantations for Biological Reclamation of Soils Polluted by ^{137}Cs and Heavy Metals, and for Control of Nutrients Leaking into Water Systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(3):43–56.
25. Rosen K, von Fircks Y, Vinichuk M, Sennerby-Forsse L. Accumulation of ^{137}Cs after potassium fertilization in plant organs of *Salix viminalis* L. and in combusted ash. *Biomass and bioenergy*. 2011;35:2765–2772.
26. Rosen K, von Fircks Y. Uptake and distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in *Salix viminalis* plants. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;63:1–14.
27. Rodzkin A, Orlovich S, Krstich B. The perspective of application of ash from willow wood as a mineral fertilizer. In: Safe food. Processing of XVIII international eco-conference, 1–4 October 2014. Novi Sad (Serbia): [publisher unknown]; 2014. p. 211–218.

References

1. Ljucko AM, Rolevich IV, Ternov VI. *Chernobyl': shans vyzhit'* [Chernobyl': chance for surviving]. Minsk: Polymja; 1996. Russian.
2. Cybul'ko, N. N. Radionuclide pollution of the Belarus area: dynamic and modern situation. *Vestnik. BGU. Seria 2, Himija. Biologija. Geografija*. 2012;1:80–84. Russian.
3. Chernuha GA., Lazarevich NV, Lalomova TV. *Radiacionnaya bezopasnost* [Radioactive safety: Textbook. Committee of Chernobyl under the Council of Ministry of Belarus]. Gorki: Belarus. State agricultural Academy. 2005. Russian.
4. Djelic G, Krstic D, Stajic J, et al. Transfer factors of natural radionuclides and ^{137}Cs from soil to plants used in traditional medicine in central Serbia. *Journal of Environmental Radioactivity* 2016;158–159:81–88.
5. Minjuk, ZP, Sharovarov GA. The modern methods of rehabilitation of polluted areas. *Vesnik MDU imja A. A. Kuljashova*. 2008;2, 3(30):173–178.. Russian.
6. Aleksandrova ZhN. Methodology of assessment of perspective for phytoremediation of radionuclide polluted soils. *Vestnik NJaC RK*2018;4:79–82. Russian.
7. Mitaev MI, Dzhantaeva MB. Phytoremediation of pollutes soil on contaminated areas (example of Grodno). *Izvestija chechenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018;3(11):64–68. Russian.
8. Demin AV, Rybal'chenko IV, Mil'kina IV. Technology of sustainable development of areas: phytoremediation as innovative method for sanitation of depressive areas. *Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija: Gosudarstvennoe i municipal'noe upravlenie*. 2022;9(2).124–136. <https://doi.org/10.22363/2312-8313-2022-9-2-124-136>. Russian.
9. Kireeva NA, Grigoriadi AS, Bagautdinov F Ja. Phytoremediation as method for cleaning of soils polluted by heavy metals. *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*. 2011;3:4–9. Russian.
10. Bekuzarova SA, Hanieva IM, Azubekov LH. Phytoremediation of toxic soils. *Uspehi sovremennogo estestvoznanija*. 2018;12:345–352. Russian.
11. Gurina IV, et al. *Agroekologicheskoe obosnovanie vedeniya sel'skohozyajstvennogo proizvodstva na melioriruemyh dlitel'no ispol'zuemyh, narushennyh i zagryaznennyh zemlyah: monografiya*. [Agroecological base for agricultural production of drained, degraded, and polluted soils: monograph]. Rjazan': FGBOU VPO RGATU; 2014. Russian.
12. Muratova AJU, et al. Physiology-biochemical reaction *Miscanthus × giganteus* for pollution of soils by heavy metals. *Jekobiotek*. 2019;2:(4):482–493. Russian.
13. Rodzkin A, Kundas S, Charnenak Y. The assessment of cost of biomass from post-mining peaty lands for pellet fabrication. *Environmental and Climate Technologies*. 2018;22(1):118–131.
14. Kundas S, Wichtman W, Rodzkin A. Use of biomass from wet peatland for energy purpose. International and renewable energy sources as alternative primary energy sources in the region: 8 International science conference. Lviv: [publisher unknown]; 2015. p. 77–81.
15. Dimitriou I, Aronsson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005;56(221):47–50.
16. Tuck G, et al. The potential distribution of bioenergy crops in Europe under present and future climate. *Biomass and Bioenergy*. 2006;30(3):183–197.
17. Stern, WB. Stroh als Quelle erneuerbarer Energie. *Swiss Bulletin für angewandte Geologie*. 2010;15(1):95–103.
18. Mola-Yudego B, et al. Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast-growing plantations. *Biofuels*. 2017;8(4):401–410.
19. Bogdevich IM, i dr. *Zemlya Belarusi. 2001* [Soil of Belarus. 2001]. Minsk: BELNICZEM; 2002. Russian.
20. Dospheov, BA. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij)* [Methodology of the field experiment (with statistical methods of results assessment)]. Moscow: Agropromizdat; 1985. Russian.
21. Annenkov BN, Judinceva EV. *Osnovy sel'skohozyajstvennoj radioekologii*. [The base of agricultural radioecology]. Moscow: Agropromizdat; 1991. Russian.
22. Oljača R, Rodzkin O, Krstić B. *Fiziologija vrba = Willow physiology*. Laktaši: University Banja Luka; 2017.
23. Rodzkin AI, Ivanykovich VA, Pronko SK. Willow wood production on radionuclide polluted areas. *Matica Srpska = Journal for Natural Sciences*. 2010;119:105–113.
24. Rodzkin A, Khroustalev B, Kundas S. Potential of Energy Willow Plantations for Biological Reclamation of Soils Polluted by ^{137}Cs and Heavy Metals, and for Control of Nutrients Leaking into Water Systems. *Environmental and Climate Technologies*. 2019;23(3):43–56.
25. Rosen K, von Fircks Y, Vinichuk M, Sennerby-Forsse L. Accumulation of ^{137}Cs after potassium fertilization in plant organs of *Salix viminalis* L. and in combusted ash. *Biomass and bioenergy*. 2011;35:2765–2772.
26. Rosen K, von Fircks Y. Uptake and distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in *Salix viminalis* plants. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2002;63:1–14.
27. Rodzkin A, Orlovich S, Krstich B. The perspective of application of ash from willow wood as a mineral fertilizer. In: Safe food. Processing of XVIII international eco-conference, 1–4 October 2014. Novi Sad (Serbia): [publisher unknown]; 2014. p. 211–218.

Статья поступила в редакцию 20.01.2023.
Received by editorial board 20.01.2023.