

УДК 504.5:631.4

С. П. Высоцкий, д-р техн. наук<sup>1</sup>, О. В. Фрунзе<sup>2</sup>

1 – ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка,

2 – ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

## ФИТОРЕАБИЛИТАЦИЯ БЛИЗЛЕЖАЩИХ К АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАССАМ ТЕРРИТОРИЙ

*Загрязнение придорожной почвы соединениями свинца приводит к его распространению по прилегающим территориям сельскохозяйственных угодий, поступает в растения и дальше по пищевой цепочке оказывает токсическое действие на животных и людей. Защита территорий от токсического действия тяжелых металлов может осуществляться с использованием растений – фитосорбентов. Одним из таких растений является клецеевина. Изучена степень сорбции свинца в побегах, бобах и корнях клецеевины.*

**Ключевые слова:** фитореабилитация, свинец, побеги растения, корни, клецеевина, граница распространения

### **Введение**

Урбанизация территорий и увеличение количества промышленных предприятий привела к интенсификации загрязнения почв на прилегающих территориях. Основные виды загрязнений зависят от типа производств, размещенных на близлежащих территориях [1].

Важнейшим компонентом биосферы планеты является почва. В почвенном покрове Земли происходит аккумуляция органических веществ, а также различных химических элементов. Почва выполняет роль биологического поглотителя, разрушителя и нейтрализатора многих загрязнителей. В результате многофункциональных особенностей почвы происходит произрастание растений и совместно с окислительными процессами восстановление свойств атмосферного воздуха. Во избежание нарушения функционирования биосферы необходимо поддержание биохимического равновесия в почвенном покрове, подвергнувшегося воздействию антропогенной деятельности.

Почвенный слой подвергается влиянию химических и биологических загрязнителей. Химические загрязнители представляют собой вредные примеси, поступающие в почву в результате воздействия загрязнений в осадках и атмосфере. Примеси могут иметь как неорганическое происхождение: кислоты, щелочи, тяжелые металлы, минеральные соли, частицы глинистых веществ, так и органическое: нефть и нефтепродукты, органические останки, поверхностно-активные вещества, пестициды и т. д.

Одними из токсичных загрязнений являются соединения металлов. При выращивании на загрязненных территориях фруктовых деревьев и овощных культур загрязнители по биологической цепочке попадают в организм человека. Поскольку многие соединения металлов обладают каталитическими свойствами, то это приводит к непредсказуемым изменениям в человеческом организме [2]. Сами соединения металлов также изменяют функционирование отдельных систем человеческого организма. Так, существуют данные о вредном воздействии соединений металлов на селезенку, которая является важным органом, обеспечивающим защиту иммунной системы человека [3, 4]. К сожалению, перечень вредных воздействий не ограничивается воздействием только на этот орган.

Учитывая изложенные факторы, возникает проблема детоксикации или реабилитации загрязненных территорий. Одним из приоритетных направлений является применение биореабилитации. Биореабилитация представляет собой высевание на загрязненных территориях специальных культур (фитосорбентов), которые обладают способностью избирательно сорбировать те или иные соединения металлов.

**Целью исследования** является оценка эффективности фитосорбента по соединениям свинца и определение емкости его поглощения, степени сорбции в отдельных элементах растения и оценка рекомендуемой площади выращивания растения для фиторемедиации.

### **Изложение основного материала исследований**

Применение биоремедиации является экологически чистой технологией, так как при этом отсутствуют затраты реагентов, использование которых приводит к вторичному загрязнению окружающей среды. При выборе фитокультур очевидно идеальным решением является применение таких культур, которые имеют минимальный вегетативный период, высокую емкость поглощения и прочно связывают загрязнения. Последнее требование подразумевает отсутствие вымывания и десорбции связанных загрязнений под воздействием атмосферных осадков. Кроме этого, биоремедиация должна включать сбор биомассы после определенного вегетационного периода, ее подсушивание (торрефикацию) и сжигание. При выполнении операции сжигания желательно, чтобы торрефицированная масса обладала относительно высокой теплотворной способностью. В этом случае при сжигании биомассы в промышленных котельных, кроме использования тепла, выделяемого в процессе сжигания, обеспечивается концентрирование токсических компонентов в золе. Зола утилизируется в металлургическом процессе. Для улавливания золы из продуктов сжигания – дымовых газов, применяются отработанные в мировой и отечественной практике решения, например очистка газовых выбросов в электрофильтрах.

Учитывая то, что продукты сжигания содержат значительное количество соединений металлов, это обеспечивает снижение удельного сопротивления дымовых газов и, соответственно, увеличение эффективности процессов очистки газов от загрязнителей.

Одним из распространенных загрязнителей в придорожных территориях в результате воздействия выбросов потоков автомобильного транспорта является свинец.

Соединения свинца выбрасываются с отработанными газами при работе двигателей автомобилей на этилированном бензине. Существует практика добавки соединений свинца в качестве антидетонирующей добавки к этилированному бензину марки А-80 в количестве 0,17 мг/кг и марки АИ-92 – в количестве 0,37 г/кг. Около 20 % общего количества свинца распространяется с выхлопными газами двигателей автомобилей, из которых 80 % оседает в виде твердых частиц размером до 25 мкм на придорожную поверхность почвы. Предельно допустимая концентрация свинца в почве составляет 32 мг/кг. В соответствии с санитарными нормами Российской Федерации допустимое увеличение концентрации свинца в почве по сравнению с естественным фоном не должно превышать 20 мг/кг.

Свинец может выщелачиваться из почвенного слоя под воздействием осадков, что приводит к загрязнению грунтовых вод и близлежащих сельскохозяйственных угодий [5].

Авторы выполнили исследование процесса реабилитации почвы с использованием поглощения свинца клещевинной или рицином (Ricinus communis). Процесс поглощения изучался в условиях гидропоники при вегетации растений в течение 40 дней при различных концентрациях соединений свинца в растворе. Бобы клещевины взвешивались, после чего сжигались в муфельной печи.

Учитывая сложность равномерного распределения соединений свинца в почве, а также непостоянство состава почвы, для изучения влияния концентрации свинца на его аккумуляцию, исследования проводились с применением циркуляции раствора сульфата свинца соответствующей концентрации. Корни растения размещались в мелком щебне. Циркуляция раствора осуществлялась только в дневное время в течение 8 часов.

Для определения концентрации свинца в побегах, бобах и корнях растений пробы превращались в золу в муфельной печи при температуре 850–900 °С. Зола обрабатывалась азотной кислотой. Раствор анализировался на содержание свинца путем колориметрического определения дитизоната свинца, окрашенного в красный цвет [6].

Обработка экспериментальных данных показала, что степень сорбции свинца в зернах клещевины описывается уравнением Вагелера – Ленгмюра [4]. На рисунке 1 показана линеаризованная зависимость содержания свинца в побегах растения от содержания свинца в растворе. Аналитическое выражение зависимости имеет вид:

$$[Pb_p] = \frac{1,20 \cdot [Pb_n]}{0,22 + [Pb_{zn}]}, \text{ мг/кг}, \quad (1)$$

где  $[Pb_p]$  – содержание свинца в побегах клещевины, мг/кг;

$[Pb_n]$  – содержание свинца в растворе, мкмоль/дм<sup>3</sup>;

$[Pb_{zn}]$  – содержание свинца в гидропоническом растворе, мкмоль/дм<sup>3</sup>.

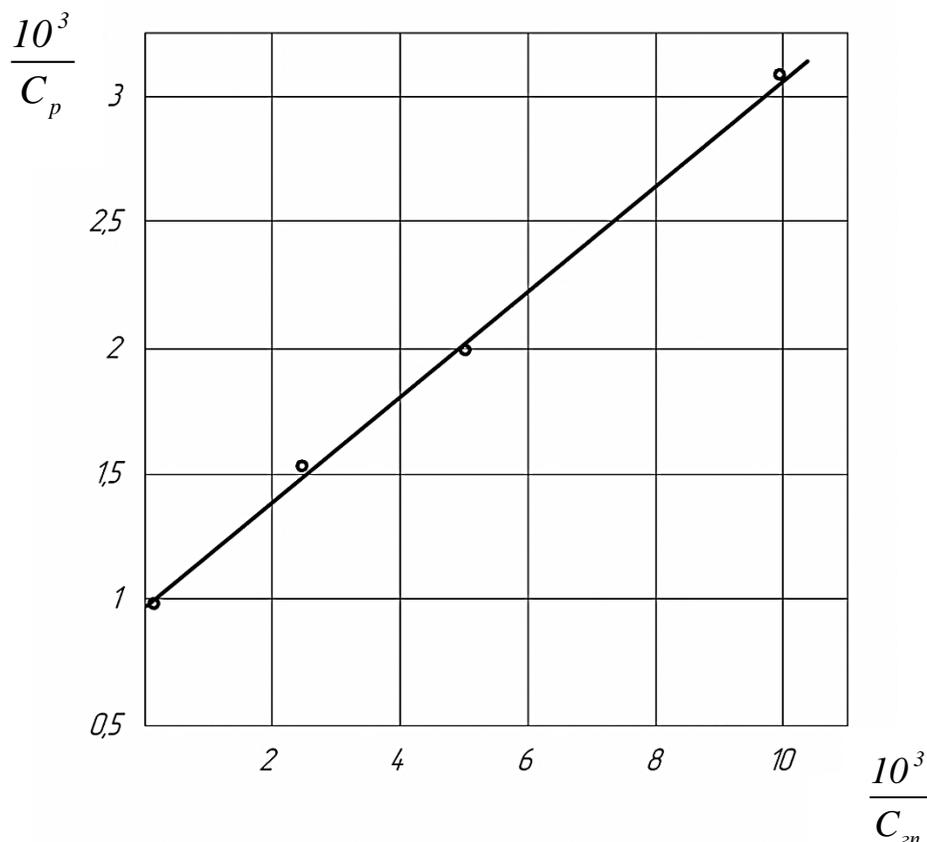


Рисунок 1 – Зависимость степени сорбции свинца побегами растений от его концентрации в гидропоническом растворе

Представляло интерес распределение концентраций в бобах растения и в корнях. Измерения показали, что бобы и корни обладают существенно большей аккумулярующей способностью по сравнению с побегами.

На рисунке 2 представлена аналитическая зависимость преобразованной концентрации свинца в бобах и корнях растения клещевины в зависимости от концентрации в гидропоническом растворе. Зависимость имеет вид:

– для бобов растения:

$$\ln\left(\frac{C_m}{C} - 1\right) = 1,63 - 2,34 \cdot C_{zn}, \quad (2)$$

где  $C_m$  – концентрация свинца в растительном материале, мг/кг;

$C$  – общая концентрация свинца, мг/кг;

$C_{zn}$  – концентрация свинца в гидропоническом растворе, мкмоль/дм<sup>3</sup>;

– для корней растения:

$$\ln\left(\frac{C_m}{C} - 1\right) = 2,17 - 2,17 \cdot 10^{-2} \cdot C_{zn} \quad (3)$$

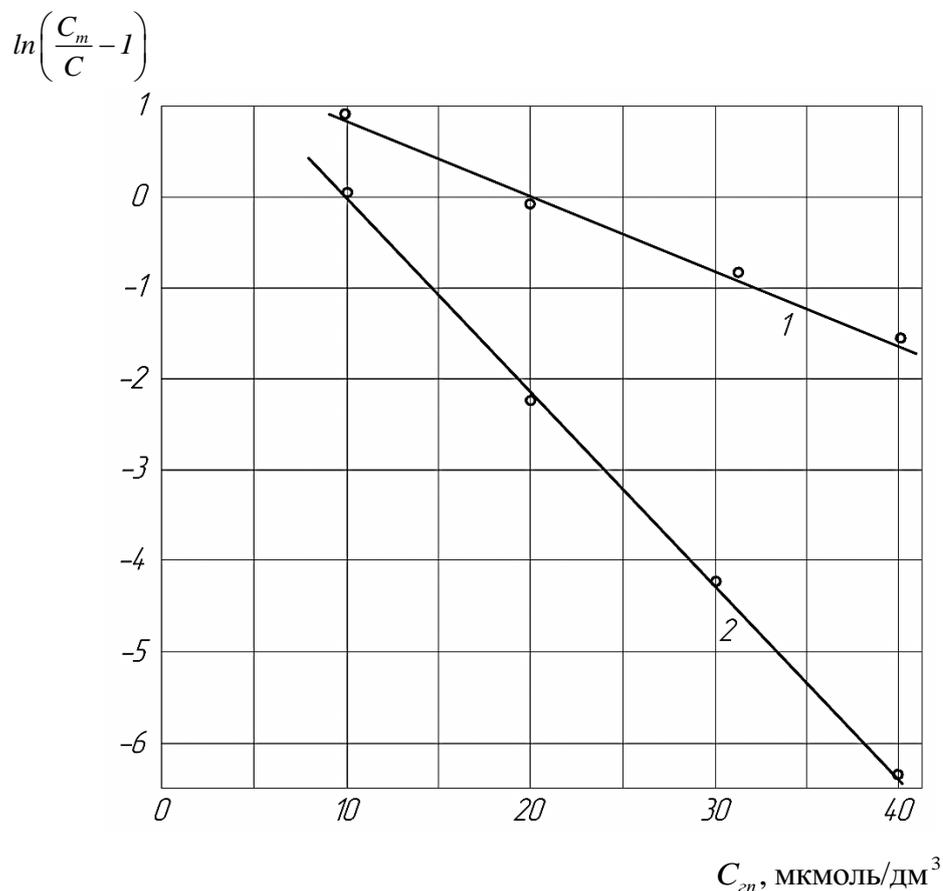


Рисунок 2 – Зависимость концентрирования свинца в бобах (1) и корнях (2) клещевины от концентрации свинца в гидропоническом растворе

В корневой системе клещевины происходит самое большое накопление соединений свинца.

Обработка данных, полученных в работах [5, 7], показала, что распределение соединений свинца в почве вблизи от автомобильных магистралей подчиняется экспоненциальной зависимости обратно пропорциональной расстоянию от кромки дороги (рисунок 3).

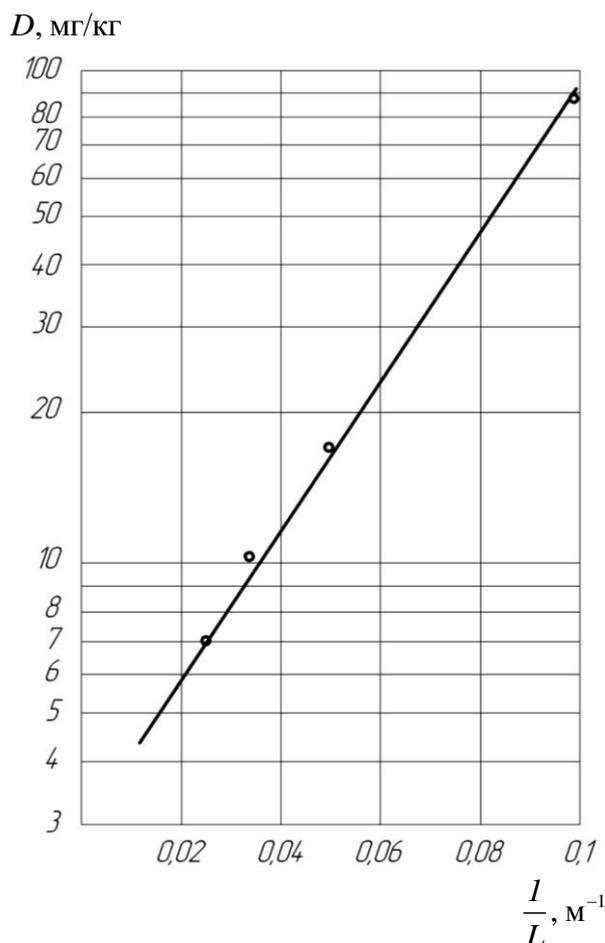


Рисунок 3 – Зависимость концентрации свинца в почве от расстояния от кромки дороги

Экспериментальная зависимость описывается следующими уравнениями:

$$\ln D = 34 \frac{1}{L} + 1,1; \quad (4)$$

$$D = 3 \exp\left(\frac{34}{L}\right), \text{ мг/кг}, \quad (5)$$

где  $D$  – концентрация свинца на расстоянии  $L$  от кромки дороги, мг/кг;

$L$  – расстояние от кромки дороги, м.

Эти данные показывают, что ширина высева клещевины должна составлять до 5 м от кромки автомобильной дороги.

### Выводы

1. Реабилитация территорий, прилегающих к автомобильным дорогам, может быть реализована за счет высеивания клещевины.
2. Клещевина обладает гипераккумулирующей способностью по соединениям свинца.
3. Концентрация свинца в корнях клещевины, как растения – аккумулятора загрязнений, примерно в 5 раз превышает концентрацию в побегах.
4. Зависимость концентрации свинца в побегах клещевины от концентрации в растворе при гидропоническом выращивании клещевины подчиняется закону Вагелера – Ленгмюра.
5. Распределение концентрации свинца между бобами и корнями растения и концентрацией свинца в растворе описывается логистической зависимостью.

6. Выведены аналитические зависимости степени концентрирования свинца в бобах и побегах клещевины в зависимости от концентрации в растворе при гидропоническом выращивании клещевины.

7. Территорию выращивания фитосорбентов целесообразно ограничить расстоянием по 2,5 м от кромки автотрассы.

### **Список литературы**

1. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы : (ГН 2.1.7.2041–06) : издание официальное : утверждены Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 19 января 2006 г. : введены в действие 23.01.2006. – Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. – 15 с. – ISBN 5-7508-0599-9.
2. Ливанов, П. А. Свинцовая опасность и здоровье человека / П. А. Ливанов // Рос. Сем. Врач. – 1999. – № 2. – С. 18–26.
3. Водяницкий, Ю. Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах / Ю. Н. Водяницкий. – Москва : ГНУ Почвенный институт им. В. В. Докучаева Россельхозакадемии, 2009. – 95 с.
4. Жовинский, Э. Я. Геохимия тяжелых металлов в почвах Украины : монография / Э. Я. Жовинский, И. В. Кураева. – Киев : Наукова думка. – 2002. – 213 с.
5. Кузьмин, С. И. Оценка экологического состояния почв в придорожных полосах автомагистралей (на примере Минской области) / С. И. Кузьмин, В. М. Феденя, А. В. Рудь // Современные проблемы геохимии, геологии и поисков месторождений полезных ископаемых : материалы научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика К. И. Лукашева, 14–16 марта 2006 г. – Минск : БГУ, 2007. – С. 127–129.
6. Справочник по свойствам, методам анализа и очистке воды / Л. А. Кульский, И. Т. Горонковский, А. М. Когановский, М. А. Шевченко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 1206 с.
7. Ахметова, Г. В. Загрязнение свинцом почв различных категорий землепользования на территории города Петрозаводска / Г. В. Ахметова, С. Г. Новиков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – С. 333.

*С. П. Высоцкий<sup>1</sup>, О. В. Фрунзе<sup>2</sup>*

*1 – ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
г. Макеевка, 2 – ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк  
Фитореабилитация близлежащих к автомобильным трассам территорий*

Донбасс отличается высокой антропогенной нагрузкой на окружающую среду. Это обусловлено наличием большого количества промышленных предприятий энергетической, металлургической и химической отраслей промышленности, а также высокой интенсивностью транспортных потоков. Последние вызывают интенсивное загрязнение почвы соединениями тяжелых металлов возле магистралей автомобильного транспорта. Наиболее токсичным загрязнителем почв является свинец. Поступление его в окружающую среду обусловлено существующей отечественной практикой повышения детонационных свойств бензинов за счет присадки тетраэтилсвинца.

При загрязнении придорожной почвы соединениями свинца он распространяется по прилегающим территориям сельскохозяйственных угодий, поступает в растения и дальше по пищевой цепочке оказывает токсическое действие на животных и людей. Защита территорий от токсического действия тяжелых металлов может осуществляться с использованием растений – фитосорбентов. Одним из таких растений является клещевина. Изучена степень сорбции свинца в побегах, бобах и корнях клещевины. Выведены аналитические зависимости степени сорбции в зависимости от концентрации свинца в гидропоническом растворе. Показано, что наиболее интенсивное накопление соединений свинца происходит в корнях растения, на втором месте по интенсивности концентрирования свинца находятся бобы и на третьем – побеги растения.

Оригинально решена задача определения интенсивности сорбции за счет использования гидропонии. Это позволило обеспечить относительное постоянство концентрации загрязнителя – свинца в исследуемых пробах.

Для определения площади территории, прилегающей к автомобильной трассе и подлежащей детоксикации, определены границы зоны распространения загрязнителей.

**ФИТОРЕАБИЛИТАЦИЯ, СВИНЕЦ, ПОБЕГИ РАСТЕНИЯ, КОРНИ, КЛЕЩЕВИНА, ГРАНИЦА РАСПРОСТРАНЕНИЯ**

*S. P. Vysotskiy<sup>1</sup>, O. V. Frunze<sup>2</sup>*

*1 – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka,*

*2 – Donetsk National Technical University, Donetsk*

**Phytorehabilitation of Territories nearby to Highways**

Donbass has a high anthropogenic load on the environment This is due to the presence of a large number of industrial enterprises in the energy, metallurgical and chemical industries, as well as high traffic intensity. The latter cause intensive soil pollution with heavy metal compounds near highways of auto transport. The most toxic soil pollutant is lead. Its release into the environment is due to the existing domestic practice of increasing the detonation properties of gasolines due to the addition of tetraethyl lead.

When roadside soil is polluted with lead compounds, it spreads over the adjacent areas of agricultural land, enters the plants and further along the food chain has a toxic effect on animals and people. Protection of territories from the toxic effects of heavy metals can be carried out using plant phytosorbents. One of these plants is castor oil plant. The degree of lead sorption in shoots, beans and roots of the castor oil plant is studied. Analytical dependences of the sorption degree depending on the concentration of lead in the hydroponic solution are derived. It is shown that the most intense accumulation of lead compounds occurs in the roots of the plant, in the second place in the intensity of lead concentration are beans and in the third place are the shoots of the plant.

The problem of determining the intensity of sorption due to the use of hydroponics is originally solved. This made it possible to ensure the relative concentration constancy of the lead pollutant in the samples studied.

To identify the area adjacent to the highway and subject to detoxification, the boundaries of the pollutant distribution area are determined.

**PHYTOREHABILITATION, LEAD, PLANT SHOOTS, ROOTS, CASTOR OIL PLANT, BOUNDARIES OF DISTRIBUTION AREA**

**Сведения об авторах:**

**С. П. Высоцкий**

SPIN-код: 7497-0100  
Scopus Author ID: 7004891012  
ORCID ID: 0000-0002-2988-7245  
Телефон: +38 (071) 391-35-97  
Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

**О. В. Фрунзе**

Телефон: +38 (071) 394-18-25  
Эл. почта: hromyh82@mail.ru

*Статья поступила 26.06.2019*

*© С. П. Высоцкий, О. В. Фрунзе, 2019*

*Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»*