

БИОЛОГИЯ

УДК 631.10

М.В. Бганцова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРЧИЦЫ САРЕПТСКОЙ И РАЙГРАСА ПАСТБИЩНОГО
ДЛЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ ЗАГРЯЗНЁННЫХ СВИНЦОМ ПОЧВ

В вегетационных и полевых опытах горчица сарептская *Brassica juncea* (L.) Czern. и райграсс пастбищный *Lolium perenne* L. выращивались на почвах с разной степенью загрязнения свинца. Была получена зависимость содержания свинца в растениях от его концентрации в почве, определен уровень загрязнения, оптимальный для выращивания данных растений в качестве фиторемедиантов.

Ключевые слова: фиторемедиация; свинец; *Brassica juncea* (L.) Czern.; *Lolium perenne* L.

Актуальность изучения способов очищения почвы от свинца обусловлена постоянным ростом степени загрязнения почвы вследствие ежегодного увеличения объёма производства и применения свинца и автотранспортной нагрузки [1]. В последние годы в индустриально развитых странах возрос интерес к развитию технологии фиторемедиации – очистке почв, загрязнённых тяжёлыми металлами, с помощью растений [2–9]. Данная технология является перспективной, т.к. является «мягкой» и недорогой по сравнению с радикальными механическими и физико-химическими способами ремедиации почв [3, 4, 8, 10–14].

Для применения технологии фиторемедиации необходимо подобрать растения-аккумуляторы тяжёлых металлов, соответствующие данным климатическим условиям [15]. Цель работы – изучение влияния исследуемых растений на содержание свинца в почве, а также воздействия свинца на рост и развитие растений.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны два растения: горчица сарептская (*Brassica juncea* (L.) Czern.), являющаяся гипераккумулятором свинца [16–18], и райграсс пастбищный (*Lolium perenne* L.) – растение, широко используемое в городском озеленении, перспективность которого в качестве фиторемедианта мало изучена.

Для проведения вегетационных опытов в УОПЭЦ «Чашниково» (Московская область) была отобрана почва верхнего $A_{\text{пах}}$ горизонта с глубины 5–20 см. В первом опыте по 800 г почвы было помещено в 32 ёмкости, на дне которых находилось по 60 грамм перлита (впитывающее вещество), отделённого от почвы марлевой прослойкой. Семена растений были помещены в почву, в которую предварительно был внесен свинец в виде соли $Pb(NO_3)_2$ в возрастающих концентрациях: 150, 250, 550 мг/кг почвы, что соответствует низкой, средней и высокой степени загрязнения почв согласно шкале экологического нормирования тяжелых металлов [19].

Семена также были помещены в почву с внесённым раствором антигололёдного покрытия – $CaCl_2$ в возрастающих концентрациях – 2,16, 4,31 и 6,47 мг/кг почвы. Каждая концентрация, а также контроль были продублированы.

Во втором вегетационном опыте по 300 г почвы было помещено в 12 ёмкостей. Семена растений были

помещены в почву, в которую предварительно был внесен свинец в виде соли $Pb(NO_3)_2$ в концентрациях 1000 и 1500 мг/кг почвы, что соответствует очень высокой степени загрязнения почв.

При искусственном поливе растения произрастали в течение месяца, после чего надземная биомасса, корни растений и почва были отобраны для анализов на содержание в них свинца.

Два аналогичных полевых опыта были заложены в УОПЭЦ «Чашниково» (Московская область) и в г. Курске. На расстоянии 3 и 10 м от дороги на участках 50×50 см были высажены горчица сарептская и райграсс пастбищный. В течение месяца растения росли в естественных условиях, после чего биомасса растений и почва были отобраны для анализов на содержание в них свинца.

Свинец в почве и растениях определялся на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС30. Подготовка проб к анализу проводилась согласно методике, предложенной А.И. Обуховым и И.О. Плехановой [20].

Результаты и обсуждение

По истечении месяца были получены следующие результаты: семена горчицы, посаженные в раствор $CaCl_2$, не проросли за исключением 2–3 проростков на минимальной концентрации. Прорастание семян райграсса было значительно выше, однако на концентрации 4,31 и 6,47 мг/кг $CaCl_2$ наблюдались лишь 2–3 растения в угнетённом состоянии, из чего можно сделать вывод о большей устойчивости райграсса к антигололёдному реагенту.

Семена растений, посаженных в почву с внесённым свинцом в концентрациях 150–550 мг/кг почвы, дали всходы. Биомасса растений, как горчицы сарептской, так и райграсса пастбищного, увеличивалась с ростом концентрации добавленного $Pb(NO_3)_2$. Прорастание семян, посаженных в почву с внесённым свинцом в концентрации 1000 и 1500 мг/кг почвы, было значительно ниже. Растения явно находились в угнетённом состоянии.

У горчицы сарептской на концентрации свинца 550 мг/кг почвы заметно замедление роста растения в высоту, а также отсутствие цветения. А на более высоких концентрациях свинца (1000 и 1500 мг/кг почвы) растения имеют угнетённый вид и небольшую биомассу. Торможение роста может происходить из-за нарушения метаболизма и в результате прямого действия свинца на

рост [21–23]. Более того, свинец может влиять на длительность митоза и всего цикла, а также вызывать нарушения в прохождении митоза [22].

Для горчицы и для райграса содержание валового и подвижного свинца различно (рис. 1), что свидетельствует о связывающей способности почвы.

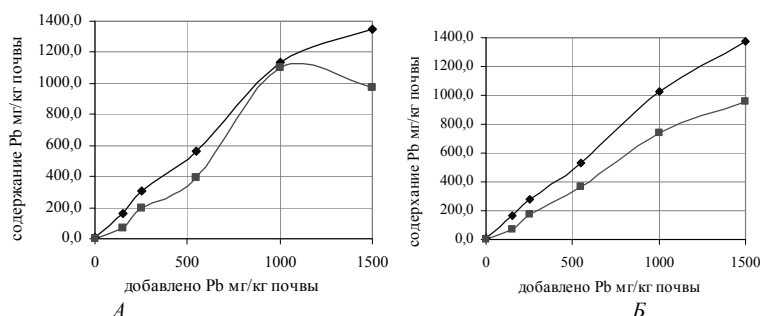


Рис. 1. Сравнение содержания валовых и подвижных соединений свинца в почве под райграсом пастбищным (А) и горчицей сарептской (Б):
 —◆— валовое содержание свинца; —■— содержание подвижного свинца

Соотношение валового и подвижного свинца неодинаково, с ростом концентрации добавленного свинца, особенно при концентрации больше 1000 мг/кг почвы, доля подвижного свинца по отношению к валовому растёт (рис. 2). По-видимому, это связано с постепенным насыщением свинцом адсорбционных центров и образованием при избытке свинца подвижных соединений.

В первом вегетационном опыте сравнение выноса свинца разными органами райграса и горчицы показало, что несмотря на то, что у райграса с ростом концентрации свинца в почве растёт его содержание в биомассе корней (рис. 3, А), сам рост корней угнетён, что и определяет резкое снижение количества поглощённого свинца на максимальной концентрации. О влиянии свинца на ингибирование роста растений было сказано выше. Количество свинца, связываемого корнями рай-

граса, значительно превышает его вынос с надземной биомассой.

У горчицы на контроле большее количество свинца связывается надземной биомассой (рис. 3, Б), затем, при росте концентрации свинца в почве, преобладает корневое поглощение. Кривая корневого поглощения свинца горчицы сарептской выполаживается и, предположительно, выходит на плато, тогда как кривая выноса листьями горчицы, наоборот, приобретает прямолинейный характер, что, возможно, свидетельствует о безбарьерном поглощении свинца.

При рассмотрении зависимостей выноса свинца надземной биомассой (рис. 4) и корневого поглощения (рис. 5) горчицы и райграса видно, что большее количество свинца горчица выносит с надземной биомассой, в то время как райграс связывает свинец корнями.

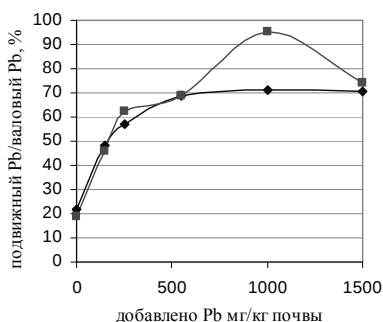


Рис. 2. Соотношение валовых и подвижных соединений свинца в почве:
 —◆— почва под горчицей сарептской —■— почва под райграсом пастбищным

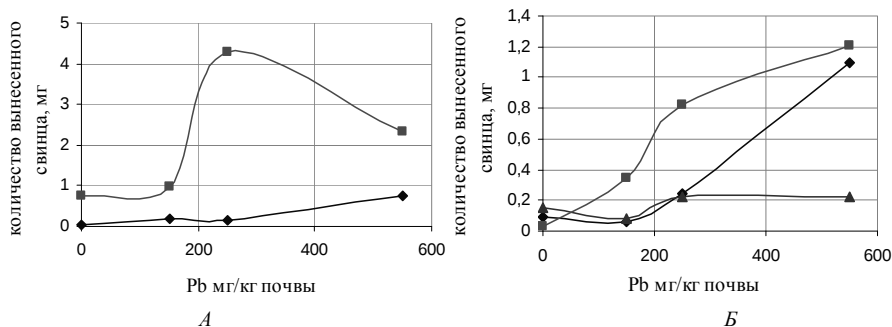


Рис. 3. Вынос свинца разными органами райграса (А) и горчицы (Б) при различном уровне загрязнения:
 —◆— листья —▲— стебли —■— корни

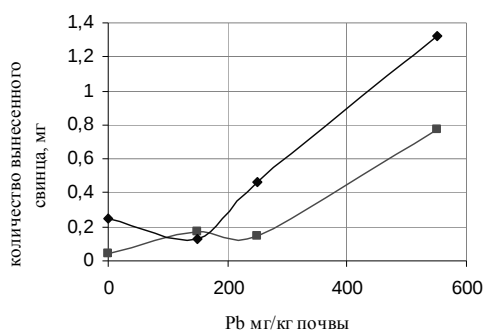


Рис. 4. Сравнение выноса свинца надземной биомассой
— ромбы — горчицы сарептской — квадраты — райграса пастбищного

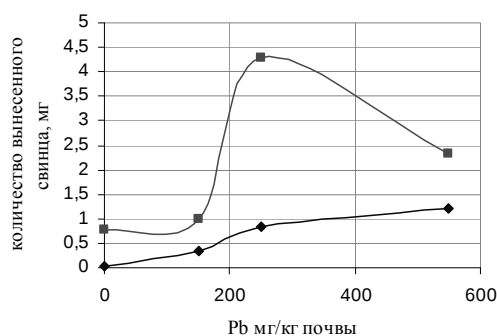


Рис. 5. Сравнение поглощения свинца корнями
— ромбы — горчицы сарептской — квадраты — райграса пастбищного

Объединением данных первого и второго вегетационных опытов были получены следующие результаты: горчица в надземной биомассе накапливает свинец в количестве, значительно превышающем его содержание в райграссе пастбищном. Горчица безбарьерно поглощает свинец, однако при высоком содержании свинца в почве растения плохо развиваются, что и определяет небольшой реальный вынос свинца из почвы с биомассой (рис. 6).

Как показали результаты опытов, уже на концентрации свинца 550 мг/кг почвы у растений горчицы заметно замедление роста, на больших концентрациях растения угнетены и не достигают необходимой биомассы. Растения райграсса более устойчивы к высоким концентрациям свинца, однако поглощают небольшое количество свинца.

Было также рассчитано процентное соотношение свинца подвижного и вынесенного с надземной биомассой: при применении горчицы сарептской для фитоэкстракции извлекается до 0,35–0,37% подвижного свинца. Принимая во внимание то, что в вегетационном опыте растения искусственно прореживались и, т.к. опыт проводился в течение месяца, не достигли своей максимальной биомассы, при выращивании растений в естественных условиях можно ожидать более высоких показателей. Так, растения горчицы, выращиваемые в Подмосковье, за месяц достигли биомассы в 2 раза большей, а в Курске в 5–6 раз большей, чем в вегетационном опыте. При подобной урожайности количество извлечённого свинца может составить 2–3%

от подвижного, при использовании эффектов фитоэкстракции и, собирая 2 урожая растений за лето, данный показатель может быть ещё выше.

При анализе полевых опытов были сделаны выводы, что придорожная почва Курска загрязнена меньше, чем почва Подмосковья. Также было заметно уменьшение содержания как подвижного, так и валового содержания свинца по мере удаления от дороги. Наиболее ярко это прослеживается в придорожной почве Подмосковья, что связано с большей автотранспортной нагрузкой и, как следствие, более высоким уровнем загрязнения придорожной полосы. В отличие от почвы, содержание свинца в которой зависело от удаления от дороги и отличалось в двух городах, содержание свинца в растениях практически одинаково (таблица), что объясняется скорее их биологическими особенностями, а также свидетельствует о том, что даже на расстоянии от дороги (10 м) растения подвержены загрязнению так же, как и в непосредственной близости от неё (3 м).

Горчица сарептская безбарьерно поглощает свинец, проявляя свойства гипераккумулятора. При применении горчицы сарептской в вегетационном опыте для фитоэкстракции извлекалось до 0,35–0,37% подвижного свинца. При более высокой урожайности растений в естественных условиях количество извлечённого свинца может составить 2–3% от подвижного, а при использовании эффекторов фитоэкстракции и, собирая 2 урожая растений за вегетационный период, данный показатель может быть ещё выше.

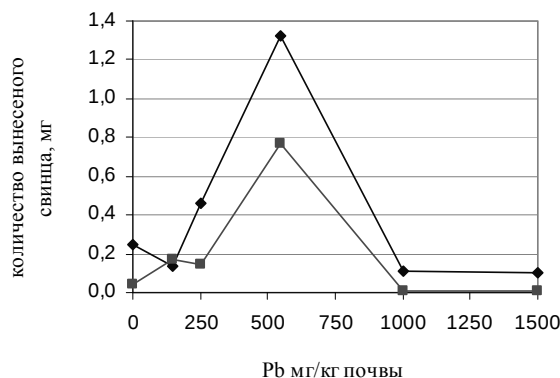


Рис. 6. Сравнение выноса свинца надземной биомассой
— ромбы — горчицы сарептской — квадраты — райграса пастбищного

Среднее содержание свинца (мг/г сухой биомассы райграса и горчицы) в Подмоскowie и Курске

Среднее содержание свинца мг/г сухой биомассы райграса пастбищного (Подмоскowie)			Среднее содержание свинца мг/г сухой биомассы горчицы сарептской (Подмоскowie)		
Содержание Pb мг/г в сухой биомассе	3 м от дороги	10 м от дороги	Содержание Pb мг/г в сухой биомассе	3 м от дороги	10 м от дороги
Надземная биомасса	0,03	0,03	Надземная биомасса	0,03	0,05
Корни	0,05	0,03	Корней	0,05	0,03
Среднее содержание свинца мг/г сухой биомассы райграса пастбищного (Курск)			Среднее содержание свинца мг/г сухой биомассы горчицы сарептской (Курск)		
Содержание Pb мг/г в сухой биомассе	3 м от дороги	10 м от дороги	Содержание Pb мг/г в сухой биомассе	3 м от дороги	10 м от дороги
Надземная биомасса	0,04	0,02	Надземная биомасса	0,03	0,03
Корни	0,03	0,03	Корни	0,02	0,02

Райграсс пастбищный обладает меньшей, по сравнению с горчицей, способностью к фитоэкстракции, однако поглощает свинец корнями, временно иммобилизуя его, к тому же он более устойчив к неблагоприятным условиям среды (высокие концентрации загрязняющих веществ, антигололédного покрытия, вытаптывание и пр.), поэтому может быть рекомендован в качестве газонной травы для озеленения обочин дорог и городского озеленения.

По опыту двух лет рекомендуется использовать данные растения при среднем уровне загрязнения почв свинцом (до 550 мг/кг почвы), т.к. при выращивании на почве с более высоким уровнем загрязнения резко снижается прорастаемость семян и биомасса растений.

Можно сделать вывод о перспективности дальнейшего исследования данных растений на предмет ис-

пользования для фиторемедиации почв со средним уровнем загрязнения свинцом: горчицу сарептскую в технологии фитоэкстракции и райграсс пастбищный в технологии фитостабилизации.

У технологии фитоэкстракции есть потенциал стать практическим ремедиационным мероприятием, в частности там, где наблюдается поверхностное (в пределах корневой зоны) загрязнение почвы тяжёлыми металлами, в особенности в регионах с перекрывающейся промышленной и сельскохозяйственной деятельностью, т.к. в отличие от почвы, содержание свинца в которой зависит от удаления от источника загрязнения, содержание свинца в растениях практически одинаково как в непосредственной близости от источника, так и на расстоянии от него.

ЛИТЕРАТУРА

1. Body P.E., Dolan P.R., Mulcahy D.E. Environmental lead: a review // Critical Reviews in Environmental Control. 1991. Vol. 20. P. 299–310.
2. Raskin I., Kumar P.B.A.N., Dushenkov S., Salt D. Bioconcentration of heavy metals by plants // Current Opinions in Biotechnology. 1994. Vol. 5. P. 285–290.
3. Salt D.E. and others. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants // Biotechnology. 1996. Vol. 13. P. 468–474.
4. Cunningham S.D., Berti W.R., Huang J.W. Phytoremediation of contaminated soils // Trends in Biotechnology. 1995. Vol. 13. P. 393–397.
5. Cunningham S.D., Ow D.W. Promises and prospects for phytoremediation // Plant Physiology. 1996. Vol. 110. P. 715–719.
6. Raskin I. and others. Bioconcentration of Metals by Plants // Environmental Biotechnology. 1994. Vol. 5. P. 285–290.
7. Moffat A. Plants proving their worth in toxic metal cleanup // Science. 1995. Vol. 269. P. 302–303.
8. Chaney R.L. and others. Potential use of metal hyperaccumulators // Mining Environmental Management. 1995. Vol. 3. P. 9–11.
9. Summary report of a workshop on phytoremediation research needs // U.S. Department of Energy. 1994. 24 p.
10. McGrath S.P., Sidoli C.M., Baker A.J.M., Reeves R.D. Using plants to clean up heavy metals in soils // 15th World Congress of Soil Science. Acapulco. Mexico. July 1994. P. 362–363.
11. Chaney R.L. and others. Phytoremediation of soil metals // Current Opinion in Biotechnology. 1997. Vol. 8. P. 279–284.
12. Glass D.J. The 2000 Phytoremediation Industry // Needham: D.J. Glass Associates Inc., 2000. 100 p.
13. Glass D.J. U.S and International Markets for Phytoremediation, 1999–2000 // Needham: D.J. Glass Associates Inc., 1999. 266 p.
14. Chen H.M., Zheng C.R., Tu C., Shen Z.G. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals // Chemosphere. 2000. Vol. 41. P. 229–234.
15. Прасад М.Н. Практическое использование растений для восстановления экосистем, загрязнённых металлами // Физиология растений. 2003. Т. 50, № 5. С. 764–780.
16. Kumar P.B.A.N., Dushenkov V., Motto H., Raskin I. Phytoextraction: The Use of Plants to Remove Heavy Metals from Soils // Environmental Science and Technology. 1995. Vol. 29. P. 1232–1238.
17. Miller R. Phytoremediation, Technology Overview Report // Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Series O. 1996. Vol. 3. 26 p. http://www.clu-in.org/download/toolkit/phyto_o.pdf
18. Blaylock M.J. and other. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents // Environmental Science and Technology. 1997. Vol. 31. P. 860–865.
19. Обухов А.И., Ефремова Л.Л. Охрана и рекультивация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Тяжёлые металлы в окружающей среде и охрана природы. М., 1988. С. 23–36.
20. Обухов А.И., Плеханова И.О. Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 184 с.
21. Серегин И.В., Иванов В.Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48, № 4. С. 606–630.
22. Wierzbicka M. Resumption of Mitotic Activity in *Allium cepa* Root Tips during Treatment with Lead Salts // Environmental and experimental botany. 1994. Vol. 34. P. 173–180.
23. Obrucheva N.V., Bystrov E.I., Ivanov V.B., Antipova O.V., Seregin I.V. Root Growth Responses to Lead in Young Maize seedlings // Plant and Soil. 1998. Vol. 200. P. 55–61.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 23 марта 2009 г.