О. А. Ветрова, СНС, К. С.-Х. Н.,

Е. В. Леоничева, ВНС, К. Б. Н.

ФГБНУ ВНИИСПК

oksana.vetrova.1972@mail.ru

УДК 631.81

10.31676/2073-4948-2018-52-100-107

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ НА БАРЬЕРНЫЕ ФУНКЦИИ РАСТЕНИЙ ЗЕМЛЯНИКИ ПО ОТНОШЕНИЮ К ТЯЖЁЛЫМ МЕТАЛЛАМ

Резюме. При помощи транслокационных коэффициентов в полевом опыте проведено сравнение сортовых особенностей накопления Pb и Ni в растениях земляники. Четыре сорта земляники (Рубиновый кулон, Мамочка, Былинная, Богема) выращивали в условиях техногенного загрязнения без удобрений и при внесении $N_{90}P_{90}K_{90}$. Установлено, что внесение удобрений ослабляло эффективность внутренних барьеров в растениях сорта Рубиновый кулон, в результате чего концентрация Pb и Ni в плодах увеличивалась в 2 раза. В то же время у сорта Богема на фоне $N_{90}P_{90}K_{90}$ снижалось поступление Pb и Ni из корней в надземную часть растения, и содержание этих элементов в плодах достоверно уменьшалось.

Ключевые слова: земляника, тяжёлые металлы, техногенное загрязнение, минеральное питание.

Summary. The comparison of variety peculiarities of Pb and Ni accumulation in strawberry plants was performed in a field experiment. Four strawberry varieties ('Rubinovy Kulon', 'Mamochka', 'Bylinnaya' and 'Bogema') were cultivated in the conditions of technogenic pollution without fertilizers and with $N_{90}P_{90}K_{90}$ application. It was determined that the fertilization weakened the effectiveness of the internal barriers in plants of 'Rubinovy Kulon', resulting in a Pb and Ni concentration increase in the fruits in 2 times. At the same time, in the variety 'Bogema' on the $N_{90}P_{90}K_{90}$ background the Pb and Ni flow from roots to aboveground part of the plant was reduced and the content of these elements in fruit was significantly decreased.

Keywords: strawberry, heavy metals, technogenic pollution, mineral nutrition.

Введение

В последние десятилетия в связи с быстрым развитием промышленности во всём мире усиливается загрязнение окружающей среды тяжёлыми металлами (ТМ) в масштабах, которые не свойственны природе [12].

Известны случаи превышения предельно-допустимых концентраций (ПДК) ТМ в плодовой и ягодной продукции, выращиваемой в условиях повышенной антропогенной нагрузки, на территории Орловской области [4]. К настоящему времени выявлены значительные сортовые различия в накоплении ТМ плодовыми и ягодными культурами, в том числе земляникой [3, 9].

Среди садовых культур земляника с ее неглубокой корневой системой, наиболее подвержена риску загрязнения ТМ, поскольку их основное количество сосредоточено ближе к верхним горизонтам почвы, где и располагаются всасывающие корни растений. Земляника очень популярна у садоводов-любителей и дачников, участки которых часто расположены вблизи шоссейных дорог и в зоне влияния промышленных центров, где велик риск накопления ТМ в растительной продукции [3, 8].

По урожайности и потребительским качествам плодов сорта, накапливающие повышенные количества токсичных ТМ, могут быть более привлекательными для выращивания. Например, было показано, что сорт земляники Богема, характеризующийся повышенным накоплением в плодах Pb и Ni, отличался при этом высокой урожайностью и крупноплодностью [3]. Поэтому актуальной задачей является оценка влияния на микроэлементный состав плодов агротехнических приёмов, используемых при выращивании земляники, с целью разработки агротехнологий, способствующих снижению экологического риска.

Наряду со специальными методами химической мелиорации, условия минерального питания также в значительной степени влияют на поступление ТМ в корень и дальнейшее движение в надземную часть растения [5-7, 9]. Внесение минеральных удобрений является важным элементом интенсивных технологий выращивания земляники, причём влияние этого агротехнического приёма на поступление различных микроэлементов в плоды может быть противоположным [10-12].

Цель наших исследований - изучение влияния условий минерального питания на поступление тяжелых металлов – свинца и никеля в растения четырех сортов земляники в условиях техногенного загрязнения почвы ТМ.

Объекты и методы исследований

Опытный участок расположен в населённом пункте Б. Думчино Мценского района Орловской области. Участок для исследований выбран ввиду его близкого расположения (на расстоянии 800 м) от крупного отвала солевых шлаков, являющихся отходами предприятия по переработке лома цветных металлов. Предварительное обследование опытного участка показало, что среднее валовое содержание Pb в почве горизонтов 0-20 и 20-40 составляет 26,2 мг/кг (0,4 ПДК_{вал}), а Ni 39,1 мг/кг (0,9 ПДК_{вал}) соответственно. При этом региональный фоновый уровень Ni превышен в 2,4 раза, а валовое содержание Pb в 2 раза выше фона.

Величина суммарного показателя загрязнения Z_c [5], рекомендуемого для комплексной оценки полиэлементного загрязнения, составила 13,75. Такие почвы, согласно нормативным требованиям, нуждаются в мероприятиях по снижению доступности токсикантов для растений. Превышения

регионально-фоновому содержанию ТМ свидетельствуют о потенциальной возможности их негативного влияния на выращиваемые культуры и получения на этом участке загрязнённой продукции.

Почва опытного участка светло-серая, лесная, суглинистая, хорошо окультуренная. Содержание гумуса 3,4 %, pH_{KCl} – 5,4, $H_{гидр.}$ – 3,0 мг-экв./100 г почвы, содержание подвижного фосфора – 34,3 мг/100 г почвы, обменного калия – 49,9 мг/100 г почвы, ЕКО – 37,5 мг-экв./100 г почвы.

Микрополевым опытом проводился в 2007-2008 гг. в 3-кратной повторности с сортами земляники: Рубиновый кулон, Мамочка, Былинная и Богема. Плотность посадки 80х20. Площадь делянки – 1,6 м². Растения выращивали без внесения удобрений и на фоне НРК. Минеральные удобрения вносили в дозах N_{90} , P_{90} , K_{90} в виде аммиачной селитры, двойного суперфосфата и сульфата калия. Содержание Pb и Ni в растительных образцах определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Для изучения сортовых особенностей накопления и распределения ТМ в 2007 и 2008 гг. в фазу плодоношения отбирались целые растения изучаемых сортов. Далее в отобранных растениях определялось содержание Pb и Ni по органам: корень, лист, плод. Математическая обработка данных выполнялась методом дисперсионного анализа с помощью программы *Excel*.

Результаты

Полученные данные о содержании ТМ в различных органах растений земляники использованы для сравнительной характеристики особенностей накопления изучаемых элементов каждым сортом (табл.). Для этого были рассчитаны транслокационные коэффициенты, характеризующие интенсивность передвижения каждого элемента из корней в плоды и листья растений.

Транслокационный коэффициент (ТК) рассчитывается как отношение содержания элемента в надземной массе растения к содержанию в корнях [1]. Этот показатель не только характеризует интенсивность перемещения элемента между органами растений, но также отражает работу физиологических барьеров.

Таблица

Показатели транслокации тяжёлых металлов в растениях земляники разных сортов, 2007-2008 гг.

Генотип	Элемент	Агрофон	Средний уровень накопления, мг/кг сухого в-ва	ТК (лист)	ТК (плод)
Рубиновый кулон	Pb	Без удобрений	0,252	1,352	0,539
		$N_{90}P_{90}K_{90}$	0,395	0,637	0,833
	Ni	Без удобрений	0,051	1,46	3,040
		$N_{90}P_{90}K_{90}$	0,059	2,2	8,000

Продолжение табл.

Генотип	Элемент	Агрофон	Средний уровень накопления, мг/кг сухого в-ва	ТК (лист)	ТК (плод)
Мамочка	Рb	Без удобрений	0,445	0,855	0,308
		N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	0,844	3,754	1,148
	Ni	Без удобрений	0,124	0,129	0,363
		N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	0,132	1,537	0,617
Былинная	Рb	Без удобрений	0,552	2,412	0,303
		N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	0,785	4,465	0,614
	Ni	Без удобрений	0,098	0,706	1,450
		N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	0,129	1,101	1,000
Богема	Рb	Без удобрений	0,540	0,638	0,497
		N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	0,316	0,498	0,336
	Ni	Без удобрений	0,172	1,645	2,463
		N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	0,106	1,812	1,812

Величина ТК $\ll 1$ свидетельствует о фиксации элемента в корнях растений. Если значение ТК ≈ 1 – элемент распределён в растении равномерно, ТК $\gg 1$ свидетельствует о накоплении элемента в надземных органах.

В экологических исследованиях транслокационные коэффициенты часто применяются при выявлении растений-гипераккумуляторов ТМ [1, 8], с целью их дальнейшего использования для фиторемедиации загрязнённых земель.

Так как наши исследования направлены на разработку элементов адаптивной технологии выращивания экологически безопасной продукции земляники, мы рассчитывали величины коэффициентов транслокации не в среднем для надземной массы растения, а для листьев и плодов отдельно.

Концентрация ТМ в надземных органах растения определяется не только интенсивностью его переноса. В работе И. А. Бакланова [2] показано, что у близкородственных видов растений, имеющих аналогичный тип распределения ТМ по органам (гипераккумуляторы либо исключатели), концентрации ТМ в одних и тех же органах при одинаковых условиях выращивания могут различаться в несколько раз. Поэтому следует учитывать и непосредственно количество элемента, поступившее в растение из окружающей среды. В связи с этим для комплексной характеристики накопления и транслокации ТМ в растениях земляники мы указываем также средний уровень содержания ТМ в растении каждого сорта (табл.). Средний уровень накопления Рb

и Ni у сорта Рубиновый кулон – наименьший среди изученных сортов. При этом растения данного сорта, выращиваемые без удобрений, имели физиологические барьеры, препятствующие поступлению в Pb плоды, в то время как транслокация Pb из корней в листья была интенсивной (ТК Pb (лист) = 1,352). При внесении минеральных удобрений, напротив, интенсивность поступления свинца в листья уменьшилась, а в плоды – возросла. По-видимому, у растений сорта Рубиновый кулон нет барьеров, препятствующих переносу Ni внутри растения, а невысокий уровень накопления элемента объясняется слабым проникновением его из окружающей среды (содержание Ni в корнях в 4-10 раз меньше, чем у других сортов, содержание в листьях – в 2-4 раза меньше). Внесение удобрений усиливало транслокацию Ni в надземные органы: ТК Ni(лист) увеличился в 1,5 раза, а ТК Ni(плод) – в 2,5 раза.

Средние уровни накопления Pb в растениях сорта Мамочка почти в 2 раза больше, чем у сорта Рубиновый кулон (табл.). При этом концентрация Pb в плодах этих сортов почти не различалась (рис.). Это объясняется тем, что у сорта Мамочка накопление Pb происходит преимущественно в листьях – независимо от агрофона ТК Pb(лист) у этого сорта в 3 раза больше, чем ТК Pb(плод).

Рис. Влияние минерального питания различных сортов земляники на содержание Pb и Ni мг/кг сух.в-в, 2007-2008 гг.

Улучшение условий минерального питания способствовало возрастанию потока Pb (как в плоды, так и в листья) и пропорциональному увеличению соответствующих коэффициентов транслокации. В результате, как видно на рисунке, концентрация Pb в плодах двукратно увеличилась. У сорта Мамочка, единственного из всех изученных сортов, на неудобренном фоне ТК Ni (лист) и ТК Ni (плод) значительно меньше 1.

В результате эффективной работы корневого барьера этот сорт имел стабильно низкое содержание Ni в плодах (рис. 1). Главной особенностью сорта Былинная в наших исследованиях было неизменное содержание Pb и Ni в плодах вне зависимости от агрофона (рис. 1). Стабильный уровень содержания Pb в плодах сорта Былинная вероятно, связан с тем, что элемент поступает преимущественно в листья, о чём свидетельствуют высокие значения ТК Pb (лист): 2,412 – без удобрений и 4,465 – на фоне $N_{90}P_{90}K_{90}$. Таким образом, у растений сорта Былинная при внесении удобрений, наряду с возрастанием потока Pb в растение, наблюдалось усиление работы защитного механизма (вывода излишнего количества Pb в листья).

Сорт Былинная по сравнению с тремя другими сортами, имел наиболее равномерное распределение Ni в растении. Особенно это заметно на фоне $N_{90}P_{90}K_{90}$: значения ТК Ni (лист) и ТК Ni (плод) равны 1. Концентрация Pb и Ni в плодах сорта Богема при выращивании растений в условиях техногенного загрязнения без применения минеральных удобрений превышала уровень накопления элементов у трёх других сортов. В отличие от них, улучшение условий минерального питания способствовало уменьшению уровня токсичных элементов в плодах. Поскольку при внесении удобрений у этого сорта уменьшались не только коэффициенты транслокации ТМ, но и средний уровень накопления элементов в растении, можно предположить, что имело место не только повышение эффективности внутренних барьеров в растении, но и эффект "ростового разбавления", что подтверждается увеличением урожайности и средней массы плодов.

Заключение

Сравнение особенностей накопления Pb и Ni изучаемыми сортами земляники в условиях техногенного загрязнения показало, что:

1. Растения сортов Былинная и Богема имели эффективные внутренние барьеры, позволяющие снизить поступление Pb в плоды. Первый из этих сортов накапливал Pb преимущественно в листьях, второй - поглощал меньше Pb из окружающей среды и удерживал его в корнях.

2. Из четырех изученных сортов только сорт Мамочка имел корневой барьер, препятствующий накоплению в плодах Ni. Сорт Рубиновый кулон от избыточного поступления Ni был защищён «наружным барьером» и отличался низким поступлением элемента из окружающей среды.

3. Внесение минеральных удобрений оказывало сортоспецифичное действие на барьерные функции растений земляники по отношению к Pb и Ni. Под влиянием удобрений в дозе $N_{90}P_{90}K_{90}$ у сорта Рубиновый кулон концентрация Pb и Ni в плодах увеличивалась, а у сорта Мамочка аналогичный эффект наблюдался только для Pb. Улучшение условий минерального питания способствовало уменьшению уровня токсичных элементов в плодах сорта Богема. Сорт Былинная отличался неизменным содержанием Pb и Ni в плодах вне зависимости от агрофона.

Список использованной литературы

1. Nagajyoti P. C., Lee K. D., Sreekanth T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // Environ. Chem. Lett., 2010. – V. 8. – P. 199-216.
2. Громова В. С. Влияние длительного применения минеральных удобрений на агроэкологические характеристики почвы и плодов яблоневого сада // Плодоводство и ягодоводство России, 1995. – Т. XXXVIII, ч. 2. – С. 153-157.
3. Ветрова О. А. К вопросу о получении экологически безопасной продукции земляники садовой в условиях техногенного загрязнения // Субтропическое и декоративное садоводство, 2013. – Т. 48. – С. 108-112.
4. Bednarek W., Tkaczyk P., Dresler S. Content of heavy metals as a criterium of the quality of strawberry fruit and soil properties // Polish Journal of Soil Science, 2006. – V. XXXIX/2. – P. 165-174.
5. Baker A. J. M. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals // Journal of Plant Nutrition, 1981. – V.3(1-4). – P. 643-654.
6. Инструктивное письмо «О выполнении работ по определению загрязнения почв» № 02-10/51-2333 от 10.12.1990. – М.: Госкомприрода СССР. – 11 с.
7. Леоничева Е. В., Мотылёва С. М., Кузнецов М. Н., Роева Т. А., Леонтьева Л. И. Формирование состава микроэлементов у ягодных растений в условиях повышенного содержания тяжёлых металлов в почве // Сельскохозяйственная биология, 2010. – № 5. – С. 31-34.
8. Минеев В. Г., Лебедева Л. А., Арзамасова А. В. Влияние последействия систем удобрения на барьерные функции растений ячменя на дерново-подзолистой почве, загрязнённой свинцом и кадмием // Агрохимия, 2009. – № 9. – С. 60-68.
9. Bystricka J., Musilova J., Trebichalsky P., Tomas J., Stanovic R., Bajcan D., Kavalcova P. The relationships between content of heavy metals in soil and in strawberries // International Journal of Phytoremediation, 2016. – V. 18(6). – P. 553-558.
10. Cardoso Pires P., Cândido F., Cardoso L. M., Costa N. M. B., Martino H. S. D., Pinheiro-Sant'Ana H. M. Comparison of mineral and trace element contents between organically and conventionally grown fruit // Fruits, 2015. – V. 70(1). – P. 29-36.
11. Байбеков П. Ф., Злобина М. В., Борисов Б. А., Ефимов О. Е., Ганжара Н. Ф. Анализ фиторемедиационного потенциала растений в условиях загрязнения дерново-подзолистых почв тяжёлыми металлами // Плодородие, 2012. – № 6. – С. 35-37.

12. Бакланов И. А., Серегин И. В., Иванов В. Б. Гистохимический анализ распределения никеля в гипераккумуляторе и исключателе из рода *Alyssum* L. // Доклады РАН, 2009. – Т. 429 (5). – С. 698-700.

O. A. Vetrova, E. V. Leonicheva

ALL Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Russia, Orel region

**THE IMPACT OF MINERAL NUTRITION ON BARRIER FUNCTIONS
OF STRAWBERRY PLANTS RELATIVE TO HEAVY METALS**