

## АДАПТИВНАЯ СПОСОБНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ САЛАТА (*Lactuca sativa* L.) И ШПИНАТА (*Spinacia oleracea* L.) К НАКОПЛЕНИЮ КАДМИЯ И СВИНЦА

А.В. ГОРБУНОВ, А.И. ИВЛИЕВ, С.М. ЛЯПУНОВ, О.И. ОКИНА, Е.Г. ДОБРУЦКАЯ, Л.В. КРИВЕНКОВ, О.В. УШАКОВА, В.А. УШАКОВ

В полевом опыте оценивали интенсивность накопления Cd и Pb и степень устойчивости к ним различных сортов листовых овощных культур (салат и шпинат) при разном содержании этих металлов в почве. Выявляли сортообразцы салата и шпината с высокой адаптивной способностью к накоплению тяжелых металлов. Определяли критическое содержание Cd и Pb в почве, при котором защитные механизмы растений перестают работать.

**Ключевые слова:** салат, *Lactuca sativa* L., шпинат, *Spinacia oleracea* L., кадмий, свинец, адаптивность.

В современных условиях остается все меньше территорий, которые можно назвать экологически чистыми. Зачастую сельскохозяйственная продукция, выращенная на этих территориях, характеризуется высоким содержанием вредных для организма веществ, к наиболее опасным из которых относятся тяжелые и токсичные металлы (1-3). Оказавшись в агрофитоценозе, они вызывают загрязнение продуктивных органов растений и с пищей попадают в организм человека.

Защита сельскохозяйственных растений от поступления тяжелых и токсичных металлов может осуществляться различными способами: глубокое запахивание верхнего загрязненного слоя почвы, интенсивное промывание почвы, внесение адсорбирующих и комплексообразующих соединений, удаление верхнего слоя почвы с последующим захоронением в специальных могильниках. Однако они являются трудоемкими и весьма дорогостоящими, кроме того, как правило, при этом происходит глубокое вмешательство в естественные и устоявшиеся сельскохозяйственные экосистемы.

Одним из наиболее перспективных способов защиты является использование адаптивного потенциала растений по устойчивости к эдафическим факторам внешней среды. Высшие растения благодаря своим морфологическим и физиологическим свойствам способны до определенной степени нейтрализовать неблагоприятные воздействия различных стрессоров. Изучение закономерностей, составляющих основу устойчивости к факторам окружающей среды, позволит диагностировать эти свойства и изменять их в необходимом для человека направлении.

По характеру накопления металлов растения можно условно разделить на три группы: накопители, аккумулирующие металлы в надземной части (как при низком, так и при высоком содержании их в почве); исключители, характеризующиеся постоянно низким содержанием металлов, количество которых до определенного значения практически не зависит от их содержания в почве; индикаторы, у которых содержание металла в тканях прямо пропорционально его количеству в почве (4, 5). Критерием классификационной принадлежности растения может служить коэффициент поглощения металла — Кп (у некоторых авторов коэффициент биологического поглощения — КБП) (6-8), отражающий соотношение между содержанием металла в растении ( $C_i$  раст.) и почве ( $C_i$  почва):  $K_p = C_i \text{ раст.} / C_i \text{ почва}$ . Он может быть рассчитан как по валовому содержанию металла в почве, так и по количеству его подвижных форм.

У растений, классифицирующихся как накопители, Кп должен быть выше 1, у исключителей — существенно ниже 1, у индикаторов — равен или близок к 1 (4, 5). Конечно, это справедливо при достаточно умеренном содержании металла в почве; при критических значениях, когда защитные механизмы растения перестают работать, величина Кп должна резко возрастать. Для каждого металла, соединения металла, а также типа почвы показатель различается.

В перспективе на основе использования адаптивной способности растений возможно создание сортов сельскохозяйственных культур нового типа: с низкой интенсивностью накопления тяжелых и токсичных металлов, что в какой-то степени позволит решить проблему получения экологически чистых продуктов питания; накапливающих максимальное количество тяжелых и токсичных металлов и пригодных для очистки загрязненных территорий (экологическая селекция); с заранее заданным содержанием тех или иных микроэлементов для использования в фармацевтической промышленности. Для развития этого направления требуется дифференцированное изучение изменения устойчивости растений к загрязнению тяжелыми и токсичными металлами на уровне семейства, рода, вида и сорта. Генетическая детерминация накопления и устойчивости культурных растений к тяжелым и токсичным металлам в пределах семейства, рода и вида известна достаточно давно (9-11), но сведения о различиях по чувствительности к избытку микроэлементов на уровне сорта появились только в последнее время (12-14).

Цель настоящей работы состояла в оценке интенсивности накопления Cd и Pb и степени устойчивости к ним у разных сортов листовых овощных культур (салат и шпинат) в условиях искусственно дозированного загрязнения почвы. В связи с этим нами были поставлены следующие задачи: разработка и прове-

дение лабораторно-полевого опыта по выращиванию растений при контролируемой степени загрязнения почвы Cd и Pb; выявление сортовой изменчивости по накоплению этих металлов и устойчивости к ним; выделение сортообразцов, способных накапливать минимальное и максимальное количество Cd и Pb в товарной части урожая.

**Методика.** Разработку, проведение опыта и анализ полученных данных осуществляли совместно специалисты Геологического института РАН (ГИН РАН) и Всероссийского НИИ селекции и семеноводства овощных культур (ВНИИССОК). Растения выращивали в открытом грунте на дерново-подзолистой суглинистой почве полигона ВНИИССОК (Одинцовский р-н, Московская обл.) на изолированном участке. Опыты мелкоделаячные, повторность 4-кратная. Содержание гумуса и фосфора в почве составляло соответственно 2,5-3,2 % и 10-25 мг/100 г; pH 5,1-6,0. Погодные условия в годы проведения эксперимента в целом были благоприятными для роста и развития возделываемых культур.

Известно, что интенсивность накопления тяжелых металлов зависит от нескольких факторов: генетических особенностей сорта, доступности для растения соединения металла (наличие подвижных форм в почве), дозы поступления и времени воздействия. Объектом исследования служили шесть сортов салата (Азарт, Алекс, Изумрудный, Московский парниковый, Подмосковье, Новогодний) и девять сортообразцов шпината (Old Dominion, Mona Liza, Garant, Pricky Large, Юань Ли Боцай, Нафис, Buterflay, Жирнолистный, Стоик) (селекция ВНИИССОК из коллекции ВИР). Посев проводили весной в технологические для этих культур сроки. В почву вносили разные дозы растворимых соединений Cd и Pb — Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Всего использовали по 5 (в отдельных вариантах 9) градаций содержания металлов в почве для каждой культуры.

За летние сезоны 2003-2004 годов было проведено четыре полевых опыта и отобрано около 700 образцов растений и почвы. Отбор, хранение и подготовку образцов к анализу осуществляли в соответствии с нормативами РФ (15). Содержание Cd и Pb определяли атомно-абсорбционным методом по стандартной методике в лаборатории ГИН РАН (16).

**Результаты.** Валовое содержание Cd и Pb в почве при проведении эксперимента варьировало соответственно от 0,4 до 810 и от 97 до 11000 мг/кг, доля подвижных форм составляла соответственно 22-42 (в среднем 31,2) и 3,3-12 (в среднем 7,5) % от валового количества (табл. 1).

### 1. Содержание Cd и Pb в почве в разных опытах (мг/кг)

Опыт	Содержание Cd		Содержание Pb	
	валовое	подвижных форм	валовое	подвижных форм
I	0,4	0,13	97	8
II	20	6	390	38
III	90	30	2200	196
IV	330	100	8500	500
V	810	280	11000	680
<b>Среднее (п.ф./в.с.·100 %)</b>		31,2 %		7,5 %

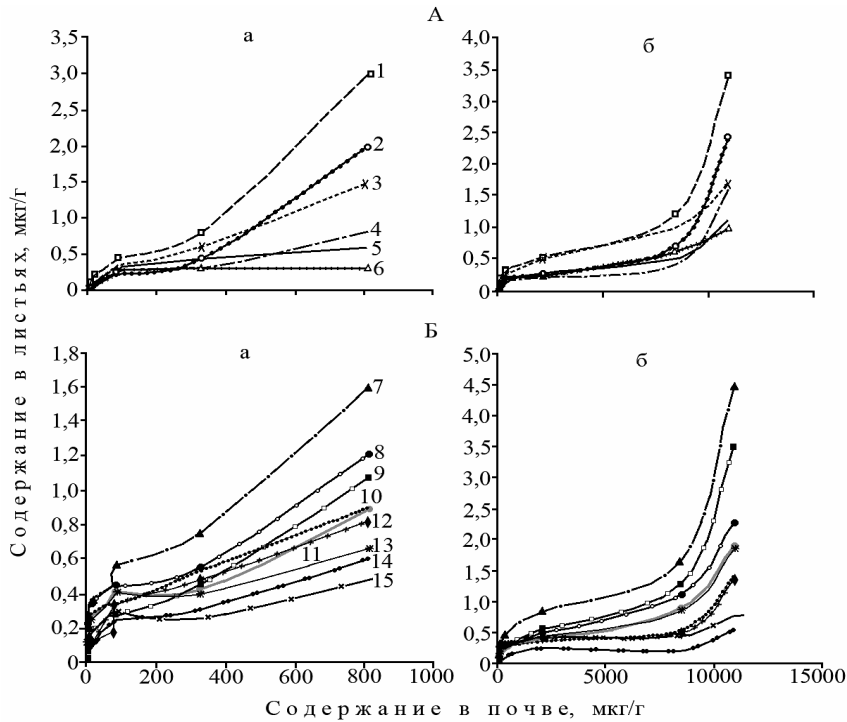
Примечание. П.ф. и в.с. — соответственно содержание подвижных форм и валовое содержание элемента в почве.

В таблице 2 приведены данные по содержанию Cd и Pb в зеленой массе растений салата и шпината, на основании которых получены графики накопления этих металлов различными сортообразцами при разном содержании металлов в почве (рис. 1). Разница в накоплении Cd растениями салата и шпината при его содержании в почве до 20 мг/кг (10 ПДК) оказалась несущественной. При дальнейшем повышении содержания этого металла различия становились значимыми (1,5-2,5 раза при 50-100 мг/кг Cd в почве и 3,3-6,5 раза при максимальном содержании). Следует отметить, что у интенсивно поглощающих этот металл сортообразцов салата и шпината при содержании Cd в почве около 300 мг/кг происходил резкий скачок накопления. Видимо, это пороговая доза, при которой у растения перестают работать защитные механизмы и накопление металла многократно возрастает (вплоть до гибели).

### 2. Содержание Cd и Pb (мг/кг сырой массы) в зеленой массе различных сортообразцов салата и шпината при разном содержании этих металлов в почве

Сортообразец	Содержание в почве, мкг/кг									
	Cd					Pb				
	0,4	20	90	330	810	97	390	2200	8500	11000
<b>С а л а т</b>										
Азарт	0,05	0,08	0,11	0,42	0,72	0,05	0,08	0,17	0,50	1,1
Алекс	0,08	0,14	0,32	0,60	1,50	0,21	0,24	0,49	1,00	2,9
Изумрудный	0,04	0,10	0,16	0,27	0,29	0,05	0,05	0,21	0,59	3,9
Московский парниковый	0,08	0,20	0,26	0,28	0,81	0,08	0,15	0,20	0,38	2,2
Подмосковье	0,11	0,18	0,37	0,64	3,00	0,09	0,17	0,37	0,56	6,1
Новогодний	0,10	0,17	0,16	0,23	2,00	0,10	0,20	0,13	0,72	3,1
<b>Ш п и н а т</b>										
Old Dominion	0,09	0,18	0,43	0,48	0,83	0,05	0,23	0,43	0,48	1,4
Mona Liza	0,09	0,23	0,21	0,51	0,60	0,07	0,13	0,21	0,23	0,6
Garant	0,12	0,14	0,67	1,01	1,60	0,08	0,27	0,67	1,01	1,6
Pricky Large	0,08	0,22	0,35	0,54	0,90	0,06	0,23	0,35	0,54	1,4
Юань ли Боцай	0,16	0,25	0,65	0,75	1,20	0,06	0,25	0,47	1,10	2,3

Нафис	0,09	0,14	0,32	0,45	1,10	0,08	0,12	0,54	1,20	2,4
Butterflay	0,08	0,23	0,44	0,40	0,67	0,06	0,23	0,41	0,85	1,9
Жирнолистный	0,13	0,19	0,27	0,26	0,55	0,05	0,24	0,27	0,44	1,1
Стоик	0,08	0,35	0,41	0,42	0,89	0,05	0,24	0,32	0,90	2,3



**Рис. 1.** Накопление Cd (а) и Pb (б) листьями салата (А) и шпината (Б) разных сортобразцов в зависимости от содержания этих металлов в почве: 1, 2, 3, 4, 5 и 6 — соответственно сорта салата Подмосковье, Новогодний, Алекс, Московский парниковый, Азарт и Изумрудный; 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 и 15 — соответственно сортобразцы шпината Garant, Юань Ли Боцай, Нафис, Стоик, Prickly Large, Old Dominion, Butterflay, Mona Liza и Жирнолистный.

растения). Для сортов, накапливающих незначительное количество Cd, кривые были более пологими, а различия по накоплению при низком и высоком содержании Cd в почве существенно меньше.

При содержании Pb в почве до 1000 мг/кг (33 ПДК) не выявлено существенных различий по накоплению этого элемента растениями салата и шпината различных сортобразцов, при 2000 мг/г и выше различия были более существенными; скачок в накоплении происходил при 8000 мг/кг, причем у сортов как с высокой, так и с низкой интенсивностью накопления Pb.

На рисунке 2 приведены кривые изменения Кп Cd и Pb листьями салата и шпината (в пересчете на общее количество внесенных в почву металлов и на содержание подвижных форм). Вторая кривая расположена выше первой (разница в значениях почти на порядок). При низком содержании Cd в почве значения Кп подвижных форм этого элемента были существенно выше 1, что свидетельствует о более интенсивном поглощении растениями металла. Значения Кп в расчете на валовое содержание металла в почве для Cd и в особенности для Pb намного меньше 1 и представлены параллельными кривыми, монотонно понижающимися до критических величин, что позволяет отнести растения салата и шпината к категории исключителей. Критическим значением содержания Cd в почве для растений салата и шпината в этих условиях является валовое содержание металла около 300 мг/кг (для Pb — около 8000 мг/кг). Представленные графики достаточно наглядно показывают различия по накоплению Cd и Pb разными сортами салата и шпината, однако при комплексной оценке сортобразцов необходимо также учитывать изменение

Рис. 2. Динамика коэффициента поглощения (Кп) Cd (а) и Pb (б) листьями салата (А) и шпината (Б) разных сортов/образцов в зависимости от содержания тяжелых металлов в почве: 1 и 2 — Кп в расчете соответственно на валовое содержание и количество подвижных форм металла в почве.

биохимического состава и хозяйственно ценных признаков в фазу технической спелости (содержание нитратов, витамина С, калия, хлорофилла, сухого вещества, масса растения, число листьев, диаметр и высота розетки и т.д.). Анализ сортов/образцов отдельно по каждому из этих параметров представляется слишком трудоемким, поэтому необходим некий суммарный коэффициент накопления положительных и отрицательных признаков. Предложенный нами коэффициент представляет собой сумму коэффициентов концентрации (Кс) *i*-го признака (16). Кс нежелательных признаков (накопление Cd, Pb, нитратов и т.д.) суммируются со знаком «-», остальные коэффициенты — со знаком «+». Суммарный коэффициент накопления рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\Sigma H} = \sum K_{ci} = (-C_{Pb}/C_{Pb \text{ контр.}}) + (-C_{Cd}/C_{Cd \text{ контр.}}) + (-C_{\text{нитр.}}/C_{\text{нитр. контр.}}) + C_{\text{сух.в.}}/C_{\text{сух.в. контр.}} + C_{\text{вит.С}}/C_{\text{вит.С контр.}} + C_{\text{хлороф.}}/C_{\text{хлороф. контр.}} + \text{и т.д.},$$

где  $K_{\Sigma H}$  — суммарный коэффициент накопления ценных положительных и отрицательных признаков;  $K_{ci}$  — коэффициент концентрации *i*-го признака (отношение величины показателей в опыте и контроле);  $C_{Pb}$ ,  $C_{Cd}$ ,  $C_{\text{нитр.}}$ ,  $C_{\text{сух.в.}}$ ,  $C_{\text{вит.С}}$ ,  $C_{\text{хлороф.}}$  и т.д. — содержание Pb, Cd, нитратов, сухого вещества, витамина С, хлорофилла и т.д. в растении в опыте;  $C_{Pb \text{ контр.}}$ ,  $C_{Cd \text{ контр.}}$ ,  $C_{\text{нитр. контр.}}$ ,  $C_{\text{сух.в. контр.}}$ ,  $C_{\text{вит.С контр.}}$ ,  $C_{\text{хлороф. контр.}}$  и т.д. — содержание Pb, Cd, нитратов, сухого вещества, витамина С, хлорофилла и т.д. в растении в контроле. Рассчитывая  $K_{\Sigma H}$  для каждого проведенного опыта, можно получить динамику накопления суммы положительных и отрицательных признаков сорта/образца, причем чем ниже значение  $K_{\Sigma H}$ , тем выше подверженность сорта/образца воздействию тяжелых металлов, чем это значение больше, тем выше его устойчивость.

На рисунке 3 представлено изменение  $K_{\Sigma H}$  у растений салата и шпината в пяти опытах. По сумме показателей наиболее устойчивыми к воздействию Cd и Pb оказались сорта салата Азарт, Изумрудный и Московский парниковый, шпината — Mona Lisa и Жирнолистный, наименее устойчивыми — сорта салата Подмосковье и Новогодний, сорта/образцы шпината Garant, Юань Ли Боцай и Нафис.

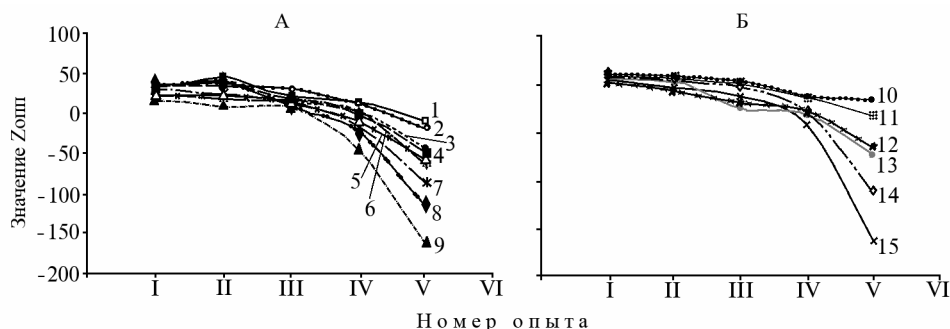


Рис. 3. Суммарный коэффициент накопления положительных и отрицательных признаков у растений шпината (А) и салата (Б) различных сортов/образцов в зависимости от содержания Cd и Pb в почве: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9 — соответственно сорта/образцы шпината Mona Lisa, Old Dominion, Жирнолистный, Prickly Large, Стоик, Butterfly, Юань Ли Боцай, Нафис и Garant; 10, 11, 12, 13, 14 и 15 — соответственно сорта салата Изумрудный, Московский парниковый, Азарт, Алекс, Новогодний и Подмосковье. I, II, III, IV и V — номер опыта (описание см. в табл. 1). Zonn — суммарный коэффициент накопления положительных и отрицательных признаков ( $K_{\Sigma H}$ ).

Итак, мы выявили содержание Cd и Pb в конкретном типе почвы (дерново-подзолистая суглинистая), при котором адаптационные способности у различных сортов салата и шпината максимально выражены, а также дозы этих металлов, при которых защитные механизмы растений перестают работать и возможна массовая гибель последних. Экспериментально доказано наличие естественного полиморфизма металлоустойчивости у различных сортов салата и шпината. Выделены наиболее и наименее адаптированные к воздействию Cd и Pb сорта, которые можно использовать в дальнейшем в селекционной работе. Показана высокая эффективность применения искусственно созданного загрязнения среды для отбора металлоустойчивых сортов, а также обоснованность использования суммарного коэффициента накопления ( $K_{\Sigma H}$ ) для оценки генетической детерминации реакции образцов на воздействие тяжелых металлов. Подход достаточно универсален и может применяться для разработки принципов экологической селекции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ершов Ю.А., Плетнева Т.В. Механизмы токсического действия неорганических соединений. М., 1989.
2. Москалев Ю.И. Минеральный обмен. М., 1985.
3. Кудрин А.В., Скальный А.В., Жаворонков А.А. и др. Иммунофармакология микроэлементов. М., 2003.
4. Вакер А.Д. Ecophysiological aspects of zinc tolerance in *Silene maritima*. New Phytologist, 1978, 80: 635-642.

5. Мельничук Ю.П. Влияние ионов кадмия на клеточное деление и рост растений. Киев, 1990.
6. Перельман А.И. Геохимия. М., 1979.
7. Кист А.А. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент, 1987.
8. Саёт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М., 1990.
9. Косицин А.В., Алексеева-Попова Н.В. Действие тяжелых металлов на растения и механизмы металлоустойчивости. В сб.: Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л., 1983: 5-22.
10. Тихомиров Ф.А., Кузнецова Н.Н., Магина Л.Г. Действие никеля на растения на дерново-подзолистой почве. Агрохимия, 1987, 8: 74-80.
11. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М., 1989: 191-201.
12. Калашникова З.В. Накопление кобальта и кадмия в урожае некоторых сельскохозяйственных культур при облучении растений на почвах, загрязненных тяжелыми металлами. Агрохимия, 1991, 9: 77-82.
13. Константинова Е.М., Ягодин Б.А., Волобуева В.Ф. Содержание кадмия и нитратов в растении салата в зависимости от ярусности и генотипа. Изв. ТСХА, 1992: 179-185.
14. Пивоваров В.Ф., Добруцкая Е.Г., Кривенков Л.В. и др. Использование искусственного загрязнения среды для повышения эффективности отбора образцов при селекции салата на устойчивость к тяжелым металлам. Вест. РАСХН, 2005, 4: 46-48.
15. Сборник методик по определению тяжелых металлов в почвах, тепличных грунтах и продукции растениеводства. М., 1998: 27-82.
16. Методы определения токсичных элементов. В сб.: Государственные стандарты. Сырье и продукты пищевые. М., 2002: 50-70.

*ГНУ Всероссийский НИИ селекции и семеноводства овощных культур,*  
143080 Московская обл., Одинцовский р-н., п/о Лесной городок,  
e-mail: vniissok@mail.ru;

*Геологический институт РАН,*  
119017 г. Москва, пер. Пыжевский, 7

*Поступила в редакцию*  
*7 февраля 2007 года*

## ADAPTIVE ABILITY OF DIFFERENT VARIETIES OF LETTUCE (*Lactuca sativa* L.) AND SPINACH (*Spinacia oleracea* L.) TO CADMIUM AND LEAD ACCUMULATION

*A.V. Gorbunov, A.I. Ivliev, S.M. Lyapunov, O.I. Okina, E.G. Dobrutskaya, L.V. Krivenkov, O.V. Ushakova, V.A. Ushakov*

### S u m m a r y

In the field experiments the authors estimated the activity of Cd and Pb accumulation and the degree of tolerance to them of different varieties of leaf vegetable crops (lettuce and spinach) to action of various soil concentrations of these metals. The lettuce and spinach kinds with high adaptive ability to accumulation of heavy metals were revealed. The authors determined also the critical content of Pb and Cd in soil under which the protective mechanisms of plant do not work and isolated the most and the least adaptive to the Cd and Pb action the varieties which may be used in subsequent breeding work. The high efficiency of an application of artificial created pollution of the environment for the selection of metal tolerant varieties and the validity of the use of cumulative rate of accumulation ( $K_{\Sigma H}$ ) for an estimation of genetic determination of varieties' reaction on heavy metals influence were shown. This method is universal enough and may be used for development of the principles of ecological breeding.