

УДК 631.811:546:635.1/.8

АККУМУЛЯЦИЯ КАДМИЯ В ОВОЩНЫХ КУЛЬТУРАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ

**Б. А. ЯГОДИН, В. Н. МАРКЕЛОВА,
И. В. ПАНФЕРОВА, И. П. МАЛАХОВА,
Т. М. ДЖАНЧАРОВ**

(Кафедра агрономической и биологической химии,
лаборатория микроэлементов)

В опытах с овощными культурами при использовании тепличного грунта, искусственно загрязненного кадмием, изучалась аккумуляция этого элемента в корнеплодах редиса и репы, а также в листьях салата. Выявлена высокая толерантность к кадмию редиса сорта Ранний красный и салата Московский парниковый. Улучшение обеспеченности растений основными элементами питания привело к снижению накопления кадмия в продукции.

Кадмий наряду со ртутью является самым опасным для здоровья человека тяжелым металлом. При поступлении в организм в небольших дозах в течение длительного периода времени этот элемент на-

капливается главным образом в печени и почках, нарушая их нормальное функционирование; период его полувыведения из организма составляет около 20—30 лет.

Подавляющее большинство исследований биологической роли кадмия посвящено его токсическому действию на теплокровных. Однако в последнее десятилетие появились данные о жизненной необходимости этого элемента для организма, поскольку в нетоксичных концентрациях он стимулирует рост, а дефицит кадмия в рационе (20 мкг/кг) вызывает задержку роста и полового созревания животных [1].

На основании результатов токсикологических исследований принята допустимая норма потребления данного элемента с продуктами питания — 400—500 мкг в неделю [8]. В организм человека 30—40 % кадмия поступает с овощами и 10 % — с мясом [9].

В почвах естественное содержание кадмия составляет 0,1—1 мг/кг [14], при содержании элемента более 3 мг/кг почвы считаются загрязненными, а концентрация 10 мг/кг для растений уже токсична.

Поступление кадмия в растения, как и многих других тяжелых металлов, зависит от pH и емкости поглощения почвы, содержания органического вещества, воды, воздуха, температуры почвы и других факторов. В работе [10] отмечается, что 75 % кадмия связано хемосорбцией ионообменно. Доступность кадмия для растений находится в зависимости прежде всего от кислотности почвы. При повышении значения pH на единицу мобильность почвенного кадмия снижается на 100 %, а содержание его в растениях — на 60 % [7]. В щелочных почвах кадмий может быть подвижен за счет образования комплексов и хелатов, при этом его потребление не зависит от pH

почвы [6]. Причем почти во всех случаях наблюдается линейная корреляция между содержанием кадмия в растительном материале и в среде [3].

Возрастающие масштабы загрязнения почв кадмием и, как следствие, продукции растительного и животного происхождения вызывают необходимость изучения условий поступления его в растения, определения реальных размеров накопления в сельскохозяйственной продукции и особенно в овощных культурах, способных аккумулировать различные химические элементы в больших количествах.

В связи с важностью данной проблемы и противоречивостью имеющихся в литературе сведений нами изучалась зависимость накопления кадмия в овощных растениях от концентрации его в субстрате, вида культуры и условий минерального питания.

Методика

В мелкоделяночных опытах (Опытная станция овощеводства Тимирязевской академии) и вегетационных (вегетационный домик кафедры агрономической и биологической химии) исследовали накопление кадмия в растениях редиса сорта Ранний красный, репы Петровская, салата Московский парниковый, выращиваемых на тепличном грунте, в зависимости от условий минерального питания и концентрации кадмия в субстрате. Реакция среды используемого в опытах грунта приближалась к нейтральной, растения были хорошо обеспечены фосфором и калием. В тепличном грунте (в расчете на сухой грунт) содержалось избыточное количество свинца и цинка — в вытяжке 1 н. HCl соответственно 27 и 565 мг/кг. Содержание кадмия составляло 0,72 мг/кг, хрома —

9,9, меди — 28,1, никеля — 9,6, кобальта — 3,3, марганца — 261 мг/кг. Если учесть, что в вытяжку 1 н. HCl переходит до 60 % элемента к валовому содержанию в почве, то, очевидно, для сравнения с предельно допустимой концентрацией (ПДК) тяжелых металлов в почвах эти цифры нужно увеличить. Для свинца ПДК (валовое содержание в почве) равна 20 мг/кг, меди — 3 (подвижные формы), никеля — 35, цинка — 23, марганца — 1500 мг/кг.

В нашей стране ПДК для кадмия не установлена, однако если сравнить его концентрацию в грунте со средним содержанием в почвах (0,01—0,7 мг/кг [2]), то можно считать, что грунт был загрязнен кадмием. В работе [5] указывается, что при концентрации кадмия в почве, превышающей 1,5 мг/кг, следует отказаться от выращивания корнеплодов, особенно зеленых культур, поскольку происходит загрязнение продукции данным элементом. В связи с этим представляет интерес установить зависимость между накоплением кадмия в овощных культурах и степенью загрязнения им грунта, а также уровнем обеспеченности растений основными элементами питания.

Вегетационные опыты проводили в сосудах Митчерлиха, вмещающих 3 кг сухого грунта. В качестве основных удобрений вносили аммиачную селитру, сульфат калия, двойной суперфосфат: под редис N — 50 мг, P₂O₅ — 35, K₂O — 100 мг на 1 кг грунта (минимальные дозы), под салат — соответственно 100, 70 и 200 мг. Повторность опытов 6- и 8-кратная.

В мелкоделяночном опыте площадь делянок — 1 м², дозы удобрений — 40N60P60K, 60N90P90K, 80N120P120K, повторность 4-кратная. Схемы опытов представлены в таблицах. В вегетационных опытах

кадмий вносили в форме сульфата из расчета 5, 10, 15, 20, 25 мг элемента на 1 кг грунта, в мелкоделяночном — 10 мг. Сроки посева культур и уборки урожая были общепринятые для условий Московской области.

Содержание тяжелых металлов в растениях определяли после сухого озоления на атомно-абсорбционном спектрометре фирмы «Perkin Elmer».

Результаты

В модельных опытах изучалось влияние 4 уровней минерального питания на урожайность редиса и накопление тяжелых металлов в корнеплодах. При внесении одинарной дозы NPK продуктивность редиса возросла в 2,5 раза, а в варианте с двойной дозой NPK — в 4 раза (табл. 1). Дальнейшее увеличение дозы NPK оказалось неэффективным. Масса корнеплодов при внесении 3NPK была практически такой же, как в варианте с 2NPK, при этом соотношение корнеплодов и ботвы возросло с 1,8 до 2,3. Более высокие дозы удобрений приводили к повышению влажности растений, в связи с этим абсолютное содер-

Таблица 1
Продуктивность редиса Ранний красный в зависимости от обеспеченности растений основными элементами питания (вегетационный опыт)

Вариант опыта	Масса корнеплодов, г/сосуд	Накопление сухой массы корнеплодов, г/сосуд	Соотношение корнеплодов и ботвы	Содержание сухого вещества, %
PK	39,5	3,24	1,8	8,2
NPK	98,5	8,18	2,3	8,3
2NPK	157,0	9,42	2,3	6,0
3NPK	155,0	8,21	1,8	5,3

Таблица 2

Накопление тяжелых металлов в корнеплодах редиса в вегетационном опыте (числитель — мг на 1 кг сухой массы, знаменатель — мг на 1 кг сырой массы)

Вариант опыта	Cd	Pb	Zn	Ni
PK	0,89*	2,57	71,7	2,61
	0,073	0,21	5,9	0,21
NPK	0,43	2,64	59,3	1,62
	0,036	0,22	4,9	0,13
2NPK	0,43	3,03	54,2	2,23
	0,025	0,18	3,2	0,13
3NPK	0,44	3,22	61,8	2,25
	0,023	0,17	3,3	0,12
ПДК, мг на 1 кг сырой массы	0,03	0,5	10,0	0,5

жание сухого вещества в корнеплодах во всех вариантах с применением NPK было практически одинаковое.

Выращивание редиса без внесения азотных удобрений приводило к формированию корнеплодов с избыточным количеством кадмия — 0,073 мг на 1 кг сырой массы, что в 2,4 раза выше ПДК (табл. 2). Внесение азота и увеличение доз NPK способствовали не только повышению урожая, но и получению корнеплодов, в которых уровень кадмия (0,023—0,036 мг на 1 кг сырой массы) находился в пределах

ПДК (0,03 мг/кг). При двойной и тройной дозах NPK концентрация кадмия в корнеплодах была самой низкой — 0,02 мг/кг.

Несмотря на загрязненность грунта свинцом и цинком, значительной аккумуляции этих элементов в корнеплодах редиса не наблюдалось (табл. 2). Содержание свинца при всех уровнях питания изменялось незначительно и в среднем составляло 0,20 мг на 1 кг сырой и 2,8 мг на 1 кг сухой массы, что в 2,5 раза ниже ПДК для свинца в овощных культурах.

Накопление цинка в корнеплодах редиса также не превышало ПДК, однако при улучшении условий питания растений содержание его в продукции снижалось почти в 2 раза — с 5,9 мг/кг в варианте PK до 3,2 мг/кг в варианте 2NPK. В литературе указывается на противоположный эффект. Так, авторы работы [13] установили, что высокие дозы азотных удобрений (120—140 кг/га) как при раздельном, так и при комбинированном применении с фосфорными или калийными удобрениями вызывают увеличение поступления металлов в растения, за исключением никеля. В условиях нашего опыта концентрация никеля так же, как и цинка, под влиянием азота удобрений снизилась с 0,21 до 0,13 мг на 1 кг сырой массы. Очевидно, столь противоречивые

Таблица 3

Продуктивность репы сорта Петровская (кг/м²) в зависимости от условий питания (мелкоделяночный опыт)

Вариант опыта	Контроль			Кадмий		
	стандартные	нестандартные	% стандартных	стандартные	нестандартные	% стандартных
Без удобрений	1,58	0,83	66	3,04	1,26	71
40N60P60K	1,84	1,04	64	2,86	1,63	64
60N90P90K	2,20	1,58	58	2,61	1,74	60
80N120P120K	2,80	1,30	68	2,77	0,80	77

данные объясняются использованием в опытах разных субстратов и растений.

С целью определения размеров аккумуляции кадмия овощными культурами и зависимости ее от условий выращивания растений на Опытной станции овощеводства ТСХА (открытый грунт) был проведен мелкоделяночный опыт.

Несмотря на высокую обеспеченность грунта основными элементами питания внесение под репу NPK вызывало увеличение продуктивности растений. Масса корнеплодов (табл. 3) возросла с 2,4 до 4,1 кг/м². Однако выход стандартных корнеплодов не зависел от условий питания и практически не различался по вариантам опыта, за исключением 60N90P90K, где масса нестандартных корнеплодов была наибольшей.

В варианте без удобрений в результате применения кадмия масса корнеплодов репы возросла почти в 2 раза. Общий уровень урожая при внесении кадмия на фоне NPK также был несколько выше. При максимальной дозе NPK масса стандартных корнеплодов как без кадмия, так и с его внесением в грунт составила 2,80 кг/м², однако в последнем случае процент стандартных корнеплодов был больше, но этот эффект пока не изучен.

Таблица 4

Концентрация кадмия в корнеплодах репы (мг на 1 кг сухой массы) при внесении его в субстрат (мелкоделяночный опыт)

Вариант опыта	Конт-роль	Кад-мий
Без удобрений	0,16	0,24
40N60P60K	0,18	0,41
60N90P90K	0,18	0,35
80N120P120K	0,15	0,23
В среднем	0,17	0,31
Содержание сухого вещества, %	10	—

Концентрация кадмия в корнеплодах репы без внесения данного элемента в грунт составила 0,15—0,18 мг на 1 кг сухой массы (была почти в 2 раза ниже ПДК), этот показатель не зависел от обеспеченности растений основными элементами питания (табл. 4). Внесенный кадмий в значительных количествах аккумулировался в корнеплодах репы. Содержание данного элемента в корнеплодах при минимальной и средней дозах NPK (соответственно 0,041 и 0,035 мг на 1 кг сырой массы) было выше ПДК. При максимальной дозе удобрений концентрация кадмия в корнеплодах практически не отличалась от его уровня в варианте, где кадмий вносили без удобрений. При выращивании репы без внесения кадмия содержание этого элемента в корнеплодах репы в среднем было в 2 раза меньше, чем на искусственно загрязненном грунте.

В вегетационных опытах 1991 г. исследовался наиболее широкий спектр концентраций кадмия. Под редис вносили 5, 10 и 15 мг кадмия на 1 кг сухого грунта при 4 уровнях питания, под салат — 5, 10, 15, 20 и 25 мг.

В литературе имеются сведения о зависимости поступления кадмия при прочих равных условиях от вида растений, а у одного и того же вида — от сорта. Опыты с 9 сортами салата, которые выращивали в одинаковых условиях, показали [11], что концентрация кадмия изменялась в зависимости от сорта в пределах 0,4—26 мг на 1 кг сухой массы. В работе [12] отмечается, что различные виды семейства капустных характеризуются наибольшей толерантностью по отношению к кадмию и способны накапливать его в значительных количествах. Из 5 изучавшихся семейств (капустные, тыквенные, злаковые, бобовые, пасленовые) наименьшая толерант-

Таблица 5
Продуктивность редиса (г/сосуд) при внесении кадмия в грунт (вегетационный опыт; ранний посев)

Вариант опыта	Контроль (без кадмия)	Доза кадмия, мг на 1 кг грунта		
		5	10	15
Без удобрений	32,8	26,8	37,0	40,6
PK	41,2	36,1	44,0	40,6
NPK	119	102	111	107
2NPK	155	170	140	144

ность свойственна растениям семейства бобовых.

В наших опытах, несмотря на очень высокие дозы кадмия, растения редиса не были угнетены. Продуктивность редиса при улучшении условий питания значительно возросла (табл. 5), что, очевидно, свидетельствует о недостатке элементов питания и особенно азота в грунте, поэтому перед поздним посевом редиса в сосуды был внесен азот из расчета 100 мг на 1 кг.

Условия минерального питания и степень загрязнения грунта кадмием отразились на аккумуляции данного элемента в корнеплодах редиса. В контрольных сосудах (без кадмия) при внесении азота и увеличении дозы NPK концентрация кадмия в корнеплодах снизилась

Таблица 6
Концентрация кадмия в корнеплодах редиса (мг на 1 кг сухой массы) в зависимости от условий минерального питания (вегетационный опыт; ранний посев)

Вариант опыта	Контроль (без кадмия)	Доза кадмия, мг на 1 кг грунта		
		5	10	15
Без удобрений	0,70	0,78	1,00	1,50
PK	0,64	0,86	1,08	1,50
NPK	0,47	0,44	1,30	1,40
2NPK	0,40	0,46	1,52	1,72

с 0,70 до 0,40 мг на 1 кг сухой массы (табл. 6). Такая же закономерность наблюдалась при внесении кадмия в дозе 5 мг на 1 кг грунта. Повышенные дозы кадмия до 10 и 15 мг/кг сопровождалось увеличением аккумуляции его в корнеплодах до 1,08—1,72 мг/кг. При внесении в грунт 15 мг этого элемента на 1 кг по фону 2NPK концентрация кадмия в корнеплодах была максимальной — 0,09 мг на 1 кг сухой массы, что в 3 раза выше ПДК.

После уборки культуры, несмотря на pH 6 и высокое содержание органического вещества в грунте, 74—76 % внесенного кадмия (табл. 7) находилось в относительно подвижной форме (вытяжка 1 н. HCl).

Таблица 7
Содержание кадмия в грунте после уборки редиса (вегетационный опыт; ранний посев)

Показатель	Контроль (без кадмия)	Доза кадмия, мг на 1 кг грунта		
		5	10	15
Внесено, мг/сосуд	—	15,0	30,0	45,0
После вегетации растений: мг/сосуд	1,36	12,4	23,3	35,8
% к внесенному	—	74,0	73,0	76,0

Высокая подвижность кадмия отмечалась многими исследователями. Так, в работе [5] указывается, что если свинец и ртуть при низкой кислотности почвы и высоком содержании органических веществ закрепляются почвенными частицами и переходят в недоступное для растений состояние, то кадмий при этих условиях отличается большой подвижностью и из загрязненных почв может попадать в растения.

Таким образом, содержание кадмия в редисе в зависимости от концентрации его в грунте может варьировать в значительных преде-

Таблица 8

Продуктивность салата сорта Московский парниковый при внесении кадмия в грунт (вегетационный опыт)

Доза кадмия на фоне NPK, мг на 1 кг грунта	Ранний посев			Поздний посев		
	сырая масса, г/растение	сухое вещество, %	зола, %	сырая масса, г/растение	сухое вещество, %	зола, %
Контроль (NPK)	144	6,1	18,6	146	5,2	15,1
5	138	5,6	19,6	143	5,2	18,7
10	143	5,6	19,6	51	4,9	17,9
15	120	8,7	13,5	124	5,5	20,8
20	129	8,7	13,4	140	5,6	20,7
25	139	9,1	13,3	164	5,3	14,9

лах — от 0,40 до 1,72 мг на 1 кг сухой массы корнеплодов. Этой культуре свойственна высокая толерантность по отношению к кадмию.

Кадмий в дозах 20 и 25 мг на 1 кг грунта практически не оказывал отрицательного действия на рост и развитие салата. Масса салата, выращенного в условиях вегетационного опыта, находилась в пределах 120—144 и 124—164 г на растение соответственно при раннем и позднем посеве (табл. 8). Исключение составил вариант с внесением 10 мг кадмия при последствии (поздний посев), масса салата в этом варианте была всего 51 г.

При внесении 15, 20, 25 мг кадмия на 1 кг грунта (ранний посев) содержание сухого вещества в растениях салата было значительно

выше (в 1,5 раза), а золы — ниже, чем в контроле и в вариантах с меньшими дозами кадмия (табл. 8). В последствии данный эффект не наблюдался. Возможно, это связано с тем, что в растениях позднего посева кадмия накопилось в 2—3 раза меньше, чем в салате раннего посева, и даже при максимальной его дозе концентрация данного элемента в растениях не достигла таковой в указанных выше вариантах; кроме того, в последствии, очевидно, снизилось количество доступного кадмия. Количество экстрагированного 1 н. HCl кадмия, внесенного перед ранним посевом, после уборки раннего салата составило 70—80 % (табл. 9). Концентрация его в грунте при большой дозе (25 мг/кг) перед 2-м посевом

Таблица 9

Содержание кадмия в грунте перед поздним посевом салата (вегетационный опыт)

Показатель	Контроль (без кадмия)	Доза кадмия, мг на 1 кг грунта				
		5	10	15	20	25
Внесено, мг/сосуд	—	15,0	30,0	45,0	60,0	75,0
После вегетации растений:						
мг/сосуд	2,85	10,7	24,0	31,5	45,9	52,2
% к внесенному	—	71,0	80,0	70,0	77,0	70,0

практически была такая же (17,4 мг/кг), как и в варианте с 15 мг кадмия при прямом действии.

Несмотря на то, что загрязнение грунта кадмием не отражалось на продуктивности салата, накопление его в растениях возрастало практически пропорционально увеличению дозы (табл. 10). Если в контроле и при минимальной дозе кадмия в салате раннего посева содержалось соответственно 0,65 и 0,82 мг на 1 кг сухой массы, то начиная с дозы 10 мг/кг концентрация его в продукции увеличилась в 2,4—11,2 раза и при внесении 25 мг на 1 кг грунта составила 0,692 мг на 1 кг сырой массы, что в 23 раза превысило ПДК для содержания кадмия в овощах. Превышение ПДК отмечено при раннем посеве салата даже в контроле, а при позднем — начиная с дозы 15 мг кадмия на 1 кг грунта.

Анализ данных о накоплении кадмия в продуктивной части исследуемых культур показал (табл. 11), что наиболее высокие уровень и вариабельность концентрации элемента характерны для салата. Наименьшее количество кадмия накапливалось в корнеплодах репы. Содержание элемента в корнеплодах редиса менялось в зависимости от условий выращивания в пределах 0,40—1,72 мг на 1 кг сухой массы.

Таким образом, листовые овощи должны рассматриваться как глав-

Таблица 10
Накопление кадмия в растениях салата (мг на 1 кг массы) в зависимости от концентрации элемента в грунте (вегетационный опыт)

Доза кадмия на фоне НРК, мг на 1 кг грунта	Ранний посев		Поздний посев (последнее действие)	
	сухая масса	сырая масса	сухая масса	сырая масса
Контроль (НРК)	0,65	0,040	0,21	0,011
5	0,82	0,046	0,55	0,029
10	1,98	0,111	0,74	0,036
15	4,56	0,397	2,80	0,154
20	6,23	0,583	3,61	0,202
25	7,60	0,692	3,80	0,281

ный источник поступления кадмия в пищевую цепь. Учитывая, что овощные культуры обладают толерантностью к повышенным концентрациям кадмия, необходим тщательный контроль за содержанием кадмия в тепличных субстратах и продукции овощеводства.

Выводы

1. В овощных культурах семейства капустных (репа, редис, салат), выращиваемых на загрязненных кадмием грунтах, накапливалось значительное (превышающее ПДК) количество этого элемента.

2. Улучшение обеспеченности растений основными элементами

Таблица 11
Концентрация кадмия в продуктивной части овощных культур

Культура	Орган	Кадмий, мг/кг	
		сухая масса	сырая масса
Редис Ранний красный	Корнеплоды	0,98 (0,40—1,72)	0,049 (0,023—0,09)
Репа Петровская	»	0,24 (0,15—0,41)	0,024 (0,015—0,041)
Салат Московский парниковый	Листья	2,80 (0,21—7,60)	0,215 (0,011—0,692)

Примечание. В скобках дана вариабельность концентрации кадмия в растениях.

питания вызывало снижение аккумуляции кадмия в продукции.

3. Растения редиса и салата обладают высокой толерантностью по отношению к кадмию. При содержании 10—25 мг кадмия на 1 кг грунта угнетения и снижения продуктивности растений не наблюдалось.

4. Концентрация кадмия в растениях салата, выращенных на сильно загрязненном этим элементом грунте, превышала ПДК кадмия в овощах при раннем посеве в 23 раза, при позднем — в 10 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авцын А. П., Жворонков А. А., Пиш М. А., Строчкова Л. С. Микроэлементозы человека.— М.: Медицина, 1991.— 2. Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях.— Л.: Агропромиздат, 1987.— 3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях.— М.: Мир, 1989.— 4. Тутельян В. А. Вредные вещества пищевых продуктов и степень их опас-

ности для здоровья человека.— В кн.: Оценка загрязнения пищевых продуктов митотоксинами. М.: Наука, 1985.— 5. Anon Y. M.— Besserer Schutz vor Schwermetallen. Der Forst und Holzwirt, 1983, Bd. 38, N 14, S. 367.— 6. Babich H., Stotzky J.— Adv. Appl. Microbiol., 1978, vol. 23, N 55, p. 11—23.— 7. Chrenekova E.— Agrochemia, 1983, vol. 23, N 12, p. 361—369.— 8. Elinde C. C., Kessler S.— Proseedings of a seminar at Uppsala, 1989, p. 116—122.— 9. Gorska M., Krynski A. Hodowla drobn Inment. 04—6366, 1988, t. 36, N 11/12, S. 6—8.— 10. Gunnarson O.— Fertilizers a. Agriculture, 1983, vol. 37, N 35, p. 27—42.— 11. Hutton M.— Phosphorus a. Pottasium, 1983 N 123, p. 33—36.— 12. Kuboi T., Noguchi A., Yazaki J.— Plant a. Soil, 1987, vol. 104, N 2, p. 275—280.— 13. Solovov Y. A., Bolyševa G. N.— Gončrova E. M. Effect of mineral fertilizers on the uptake of metals by plants in natural flood ploun meadows. Vestn. Mosk. Univ. Ser XVII Počvoved, 0, 1987, t. 3, S. 52—56.— 14. Tomková D., Mareček J. Problematika obsaku Cd v průmyslových hnojivech. Zpráva VUAnCh, VZ-E-1230, 1988.

Статья поступила 14 декабря 1992 г.

SUMMARY

In experiments with vegetable crops grown in the greenhouse ground artificially contaminated with cadmium accumulation of this element in root crops of radish and turnip, as well as in salad leaves, was studied. High tolerance to cadmium has been found in Early red variety of radish and in Moscow hotbed salad. Higher supply of plants with the main nutrient elements resulted in lower accumulation of cadmium in the product.