

УДК G31.SU.033:546.74:635.652

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НИКЕЛЯ В РАСТЕНИЯХ ФАСОЛИ

И. В. АНДРЕЕВА, В. В. ГОВОРИНА, Б. А. ЯГОДИН

(Кафедра агрохимии)

Обсуждаются данные вегетационных опытов о накоплении и распределении никеля в растениях фасоли в онтогенезе. Установлена тесная зависимость между уровнем содержания никеля в почве и концентрацией его в растениях во все фазы развития; изменений в накоплении биомассы при этом не наблюдалось. Накопление никеля растениями фасоли продолжалось в течение всего периода вегетации и достигало максимума к моменту полной спелости. При этом концентрация элемента в генеративных органах была выше, чем в вегетативных. Предполагается, что во время созревания урожая происходило перераспределение никеля из корней и вегетативных органов в бобы.

Среди факторов, оказывающих влияние на элементный химический состав растений, все большее значение приобретает экологический. В условиях техногенного и антропогенного загрязнения среды действие генетического контроля снижается, в результате чего нарушаются сложившиеся эволюционно соотношения элементов. Одними из наиболее опасных загрязняющих веществ признаны тяжелые металлы.

Продукция растениеводства, выращенная даже на слабозагрязненных почвах, представляет определенную опасность из-за возможности кумулятивного эффекта и постепенного накопления металлов в пищевой цепи. В сложившейся ситуации очень важно знание закономерностей распределения тяжелых металлов в тканях и органах сельскохозяйственных растений для разработки достоверных методов оценки качест-

ва урожая и сертификации продукции.

Общеизвестно, что уровень накопления тяжелых металлов в репродуктивных органах значительно ниже, чем в вегетативных. Это является эволюционным приспособлением для сохранения генотипических пропорций химических элементов у будущего проростка, способствуя тем самым передаче информации о видовых особенностях элементного химического состава [3, 5]. Последний, в свою очередь, зависит от биологических особенностей культуры, физиологической роли элемента, его содержания в почве и доступности для растений [1, 7, 10]. Так, по данным разных исследователей и результатам наших экспериментов, такая культура, как овес, обладает способностью к преимущественному накоплению никеля именно в генеративных органах. Это связано, вероятно, с биологическими особенностями данной культуры, с одной стороны, и с особенностями самого никеля, с другой. Некоторые исследователи указывают на значительную подвижность этого элемента как в почвах, так и в растениях, особенно в условиях повышенной почвенной кислотности [8, 12, 14, 17]. Учитывая большое пищевое и кормовое значение овса, воз-

никает опасность попадания никеля в организм человека и сельскохозяйственных животных. По данным некоторых авторов, аналогичной способностью к концентрированию никеля в генеративных органах обладают также бобовые культуры [13]. Например, 78% никеля, транспортированного из корней в надземную часть растений сои, было обнаружено в семенах (главным образом, в семядолях) [14]. О мобильности никеля у бобовых свидетельствует работа Guo [15], в которой изучалась сравнительная флоэмная подвижность ^{63}Ni , ^{86}Rb и ^{45}Ca , нанесенных на верхушки листьев растений гороха. Было обнаружено, что никель чрезвычайно мобилен и транспортировался из верхушек листьев в аккумулирующие ткани по флоэме. Аналогичный вывод был сделан не только в отношении бобовых, но и растений других видов [16].

Ранее нами проводились исследования с целью изучения особенностей аккумуляции никеля растениями овса, а также динамики его накопления и распределения в различные фазы развития [2, 9], в которых было установлено, что наибольшее накопление никеля происходит в фазу молочной спелости, а затем его концентрация снижается. Были отмечены высокая под-

вижность никеля в растениях овса и его выделение корнями в почву к фазе полной спелости. При этом содержание никеля в генеративных органах оказалось выше, чем в вегетативных.

Цель настоящих исследований состояла в изучении способности бобовых аккумулировать никель при нефитотоксичных уровнях содержания его в почве, а также в выявлении особенностей распределения этого элемента в растениях фасоли в онтогенезе. Этот эксперимент явился продолжением проведенного ранее аналогичного опыта с овсом, что позволило сравнить параметры поглощения никеля двумя разными биологическими видами и соответственно повысить достоверность и значимость полученных результатов.

Методика

Вегетационный опыт проводился на базе вегетационного домика кафедры агрохимии МСХА в сосудах Митчерлиха с фасолью сорта Фаленская. Почва дерново-подзолистая среднесуглинистая хорошо окультуренная из учхоза «Михайловское» Подольского района Московской области имела следующую агрохимическую характеристику: $pH_{\text{сод}}$ — 5,0, гумус по Тюрину — 1,4%, Нг —

1,7 мгэкв/100 г, P_2O_6 и K_2O по Кирсанову — 200 и 360 мг/кг, Ni — 2,75 мг/кг (1 н. НС1). Никель вносили в почву в виде $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ в количестве 2,5, 10 и 25 мг/кг почвы. Опыт проводили в 3-кратной повторности по схеме, представленной в таблицах. В каждый сосуд высаживали 5 проросших семян фасоли. Растения убирали отдельными сосудами в следующие фазы развития: 2 настоящих листа, 4 настоящих листа, цветение, зеленые бобики, полная спелость. Никель в сухом растительном материале определяли атомно-адсорбционным методом на спектрофотометре «Varian» после сухого озоления. Статистическую обработку данных проводили с использованием прикладной программы STRAZ.

Результаты

В исследуемом диапазоне доз никеля не происходило статистически достоверного изменения в накоплении биомассы растениями фасоли во время прохождения основных фаз развития (табл. 1). Это соответствовало поставленным задачам опыта и позволило исследовать способность фасоли к накоплению никеля при отсутствии токсического эффекта данного элемента на рост и развитие растений.

**Накопление биомассы (г/сосуд) в растениях фасоли
в онтогенезе**

Часть растения	НРК-фон	Фон + Ni, мг/кг почвы			НРС, г/сосуд
		2,5	10	25	
<i>Фаза 2 настоящих листьев</i>					
Общая масса	13,0	13,4	13,8	11,9	
Надземная масса	10,5	11,2	11,1	9,9	2,3
Корни	2,5	2,2	2,7	2,0	0,6
<i>Фаза 4 настоящих листьев</i>					
Общая масса	29,3	31,0	30,5	28,7	
Надземная масса	24,2	26,2	25,6	23,8	3,6
Корни	5,1	4,8	4,9	4,9	1,9
<i>Фаза цветения</i>					
Общая масса	41,9	45,7	45,2	40,4	
Надземная масса	35,8	38,3	37,5	33,2	3,1
Корни	6,1	7,4	7,7	7,2	1,7
<i>Фаза зеленых бобиков</i>					
Общая масса	69,1	73,0	71,8	71,6	
Бобы	12,8	15,1	15,9	13,6	3,1
Листья	25,9	26,2	25,4	25,8	3,3
Стебли	20,5	20,8	20,4	20,3	2,1
Корни	9,9	10,9	10,1	11,9	2,5
<i>Фаза полной спелости</i>					
Общая масса	80,1	91,2	88,6	89,1	
Семена	16,4	20,8	17,1	19,6	7,1
Створки бобов	13,8	16,8	14,2	16,1	2,7
Листья	26,6	27,4	28,9	28,9	3,1
Стебли	13,2	16,6	15,5	14,7	2,3
Корни	10,1	9,6	12,9	9,8	2,4

Несмотря на отсутствие влияния никеля на изменение биомассы различных органов фасоли, во все фазы развития наблюдалось увеличение накопления элемента в растениях с повышением его уровня в почве (табл. 2).

К фазе 2 настоящих листьев с повышением содержания никеля в почве концентрация его в надземной массе возрастала в 3,5-17,3, в корнях — в 1,4-6,1 раза по сравнению с контролем. При этом в корнях элемента накапливалось в 2,7-7,6 раза больше, чем

Содержание никеля и в растениях фасоли и онтогенезе

(в числителе — мг Ni на 1 кг сухой массы,
в знаменателе — % к общему выносу)

Часть растения	НРК-фон	Фон + Ni, мг/кг почвы			НСР, мг/кг
		2,5	10	25	
<i>Фаза 2 настоящих листьев</i>					
Надземная масса	<u>0,8</u> 33	<u>2,8</u> 60	<u>9,0</u> 59	<u>13,8</u> 64	4,2
Корни	<u>6,1</u> 67	<u>8,3</u> 40	<u>24,9</u> 41	<u>37,5</u> 36	2,5
<i>Фаза 4 настоящих листьев</i>					
Надземная масса	<u>1,5</u> 57	<u>3,7</u> 71	<u>7,9</u> 67	<u>11,6</u> 65	2,8
Корни	<u>6,3</u> 43	<u>8,8</u> 29	<u>21,1</u> 33	<u>30,8</u> 35	2,6
<i>Фаза цветения</i>					
Надземная масса	<u>2,4</u> 69	<u>5,1</u> 71	<u>11,7</u> 71	<u>18,3</u> 75	1,9
Корни	<u>7,0</u> 31	<u>10,7</u> 29	<u>23,0</u> 29	<u>27,2</u> 25	2,5
<i>Фаза зеленых бобиков</i>					
Бобы	<u>5,2</u> 33	<u>11,4</u> 43	<u>25,2</u> 49	<u>38,7</u> 35	1,9
Листья	<u>0,9</u> 14	<u>1,8</u> 12	<u>2,8</u> 10	<u>6,4</u> 12	0,8
Стебли	<u>1,9</u> 19	<u>3,3</u> 17	<u>8,8</u> 22	<u>21,0</u> 28	4,0
Корни	<u>7,3</u> 34	<u>10,5</u> 28	<u>15,0</u> 19	<u>31,7</u> 25	4,0
<i>Фаза полной спелости</i>					
Семена	<u>5,8</u> 24	<u>9,4</u> 44	<u>25,7</u> 39	<u>43,6</u> 51	0,6
Створки бобов	<u>1,3</u> 5	<u>1,6</u> 7	<u>5,9</u> 7	<u>8,9</u> 9	0,5
Листья	<u>1,6</u> 11	<u>2,4</u> 13	<u>4,8</u> 12	<u>4,9</u> 9	1,8
Стебли	<u>0,5</u> 3	<u>1,2</u> 4	<u>3,7</u> 5	<u>8,4</u> 7	2,0
Корни	<u>20,5</u> 57	<u>14,5</u> 31	<u>32,0</u> 37	<u>41,1</u> 24	4,7

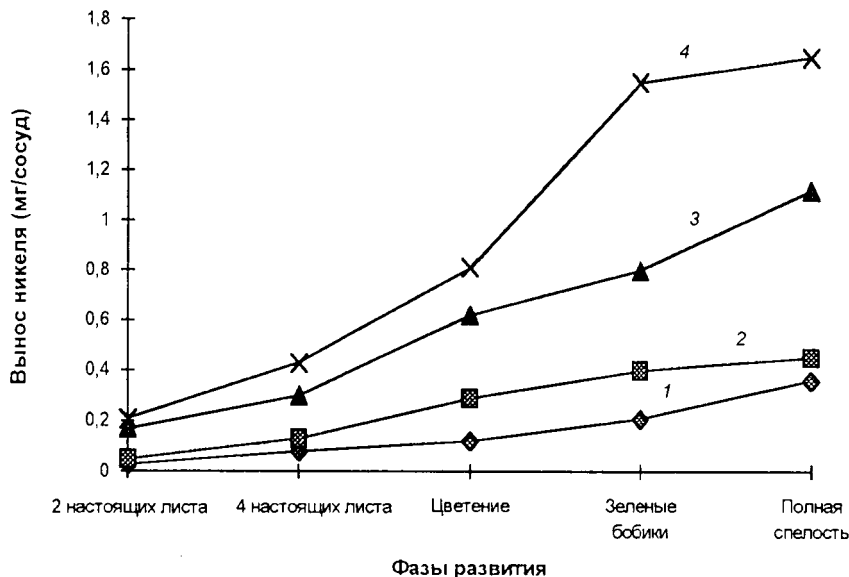
в надземной массе. Однако 59—64% никеля общего выноса концентрировалось, за исключением контрольного варианта, в надземной массе.

В фазу 4 настоящих листьев контрольные растения фасоли продолжали накапливать никель и при его внесении 2,5 мг/кг. В остальных двух вариантах содержание элемента как в надземной массе, так и в корнях несколько снизилось по сравнению с уровнем в предыдущей фазе. Вынос никеля надземной массой по сравнению с предыдущей фазой увеличился и составил в вариантах с экзогенным никелем 65-71% от общего. В контрольном варианте вынос элемента надземной массой также превышал данный показатель в корнях.

В фазу цветения происходило дальнейшее увеличение концентрации никеля во всех органах фасоли: в надземной массе — в 2,1 —7,6, в корнях — в 1,5-3,9 раза по сравнению с контролем. Как и в предыдущие фазы, большая часть никеля перемещалась в надземную массу. Так, если в фазы 2 и 4 настоящих листьев в варианте с наибольшей дозой никеля его вынос надземной массой достигал 64-65% от общего, то в фазу цветения — уже 75%. Соответственно доля выноса элемента корнями растений снижалась.

Необходимо отметить, что в фазу цветения (в вариантах 2,5 и 10 мг никеля на 1 кг почвы) и зеленых бобиков (в варианте 25 мг/кг) вынос элемента происходил особенно интенсивно, что совпадало с периодом максимального накопления биомассы, в то время как в контроле этот процесс был более равномерным (см. график). В то же время вынос никеля корнями к фазе зеленых бобиков замедлился, а в варианте с 10 мг/кг, возможно, происходил отток накопленного корнями никеля в надземную часть. В рассматриваемую фазу содержание никеля в бобах при всех дозах внесения было выше, чем в корнях, чего не наблюдалось в контроле. Наиболее ярко это проявилось в варианте с 10 мг/кг: бобы накапливали в 1,7 раза больше никеля, чем корни. Однако структура распределения элемента по органам была общей для всех вариантов: наибольшее количество никеля (46-61%), переместившегося в надземную часть растений фасоли, было обнаружено в бобах. Вынос никеля стеблями и особенно листьями был значительно ниже: соответственно 17—28 и 10-14%.

К моменту полного созревания фасоли наблюдалось максимальное накопление никеля в растениях во всех



Вынос никеля растениями фасоли в основные фазы развития:
 1 — НРК + фон. 2 — фон + Ni (2,5 мг/кг), 3 — фон + Ni (10 мг/кг), 4 — фон + Ni (25 мг/кг).

вариантах (см. график). Отмеченное нами ранее для овса [2] снижение содержания никеля в растениях к моменту созревания урожая не подтвердилось в случае с фасолью. накопление никеля надземными органами у последней замедлилось. Расчеты выноса никеля надземными органами свидетельствуют о незначительной доле листьев, особенно створок бобов и стеблей, в распределении элемента в надземной части растений фасоли. Так, вынос никеля стеблями значительно снизился по сравнению с фазой цветения и составил

всего 3 — 7% к общему уровню. При этом 24-51% никеля общего выноса надземными органами было обнаружено в семенах. Доля корней в распределении изучаемого элемента в растениях к фазе полной спелости стала более заметной, чем в предыдущую фазу (24-57% общего выноса). Однако в вариантах с экзогенным никелем по-прежнему происходило концентрирование его генеративными органами, вынос которыми при внесении никеля 25 мг/кг почвы был в 2,2 раза выше выноса корнями.

Заключение

Таким образом, несмотря на отсутствие достоверного влияния внесенного в почву никеля на накопление биологической массы растениями фасоли во все фазы развития, с повышением уровня почвенного никеля увеличивалось его содержание во всех органах растений. Даже при внесении никеля 25 мг/кг почвы, что соответствует среднему уровню загрязнения, отсутствовали видимые признаки токсикоза растений и снижение их биомассы, при этом отмечалось накопление никеля надземной массой в целом в 4,8 раза. Однозначного мнения о значении никеля для растений, аккумулирующих его в больших количествах в генеративных органах, пока не существует. Так, в [4] значительное количество никеля, а также меди, в генеративных органах бобовых предположительно связывают с участием этих элементов в воспроизводительной функции растений. По мнению некоторых авторов [14], высокая аккумуляция никеля в семенах связана с перераспределением этого элемента из вегетативных органов во время созревания растений. Этот вывод косвенно подтверждает результаты нашего опыта. Непосредственно свидетельствовать о

перераспределении элемента по органам могут эксперименты с применением меченых атомов.

Согласно полученным нами данным, на всех этапах онтогенеза в вариантах с внесением никеля вынос его надземной массой превышал вынос корнями. Доля никеля в корнях к общему его выносу растениями фасоли снижалась к фазе полной спелости, а затем возрастала. По-видимому, в период созревания генеративных органов основной вынос никеля приходился на корни, в то время как в надземной массе происходило дальнейшее его перераспределение. Об этом свидетельствует снижение выноса стеблями (в 3-4 раза), листьями (в 1,4 раза в варианте с наибольшей дозой никеля) и его повышение в бобах (в 1,3-1,9 раза). Возможно, у культур с растянутым периодом созревания наряду с продолжающимся поступлением элемента из почвы одновременно происходит перераспределение накопленного ранее никеля между органами надземной части растений и корнями. Например, в работе [15] также отмечается, что при старении растений происходило перераспределение более 70% никеля, находящегося в побегах, в семена. На подобное перемещение химических элемен-

тов в растении в случае, когда концентрация ионов в листьях не вызывает негативных явлений, указывается в [11]: при переходе растений в репродуктивную фазу своего развития основные макроэлементы (N, P, K, S) перемещаются в плоды и семена, а большинство микроэлементов (Ca, Fe, Mn, Zn, B) накапливается в стеблях и старых листьях. Возможно, никель в растениях фасоли проявляет свойства, приближающие его к действию первой группы элементов, хотя, разумеется, физиологическая основа этих механизмов разная. Можно предположить, что такое поведение никеля связано скорее с его химическими свойствами, обуславливающими чрезвычайную подвижность в растениях, чем с выполнением определенной физиологической роли в растительном организме.

Полученные в ходе эксперимента результаты свидетельствуют также о существовании значительных видовых различий в поглощении и распределении никеля. Имеются достаточно противоречивые данные о динамике накопления этого элемента зерновыми культурами в онтогенез [2, 6, 18]. Однако все они указывают на существование максимума поглощения никеля, после которого содер-

жание элемента в растениях снижается. В опыте с фасолью эти результаты не подтвердились: в течение всей вегетации накопление никеля растениями возрастало и достигло максимального значения в урожае.

Выявленное нами ранее для овса преимущественное накопление никеля в генеративных органах в целом было характерно, хотя и в меньшей степени, для растений фасоли. В фазу зеленых бобиков содержание никеля в бобах было в 1,4-2,2 и 1,1 —1,7 раза выше, чем соответственно в вегетативных органах и корнях. По достижении полной спелости в семенах по-прежнему содержалось больше никеля, чем в листья и стеблях, но меньше, чем в корнях. Однако при увеличении уровня никеля в почве соотношение между содержанием элемента в семенах и корнях сужалось, а в варианте с наибольшей дозой никеля концентрация его в семенах оказывалась выше, чем в корнях.

Следовательно, можно заключить, что фасоль, а возможно, и другие бобовые культуры, обладают способностью без проявления видимых признаков токсикоза и снижения продуктивности в определенном диапазоне концентраций элемента в почве аккумулировать никель

в репродуктивных органах. Эту закономерность необходимо учитывать при выращивании культур на загрязненных никелем территориях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексахин Р. М., Голубев А. В., Черников В. А. и др.* Агроэкология. М.: Колос, 2000, с. 472-479. — 2. *Андреева И. В., Говорина В. В., Ягодин Б. А. и др.* Динамика накопления и распределения никеля в растениях овса. — *Агрохимия*, 2000, № 4, с. 68-71. — 3. *Гармаш Г. А., Гармаш Н. Ю.* Распределение тяжелых металлов по органам культурных растений. — *Агрохимия*, 1987, № 5, с. 40-46. — 4. *Грибовская И. Ф., Летунова С. В., Романова С. Н.* Микроэлементы в органах (дикорастущих) бобовых растений. — *Агрохимия*, 1968, № 3, с. 81-87. — 5. *Ильин В. Б.* Элементный химический состав растений. Новосибирск: Наука, 1985. — 6. *Кройтору И. Г.* Накопление фосфора, цинка и никеля растениями озимой пшеницы при внесении разных доз фосфорных удобрений на карбонатном черноземе. — *Сб.: Удобрение культур, вынос и баланс веществ в севообороте*, 1985, с. 41-45. — 7. *Мамедов О. Г., Теймурова Т. С., Гусейнова А. Г.* Со-

держание тяжелых металлов в почвах и растениях вокруг промышленных объектов г. Мингечаур Азербайджанской ССР — *Тез. докл. науч. конф.: Микроэлементы в биологии и их применение в сельском хозяйстве и медицине.* Самарканд: СамГУ, 1990, с. 188-190. — 8. *Огольва В. П., Чердакова Л. Н.* Закономерности распределения никеля в растениях Вологодской области. — *Агрохимия*, 1981, № 12, с. 90-92. — 9. *Рудакова Э. В., Каракис К. Д., Сидоршина Т. М.* Механизмы поглощения микроэлементов растениями. — *В сб.: Микроэлементы: поступление, транспорт и физиологические функции в растениях.* — Киев: Наукова думка, 1987, с. 5-64. — 10. *Сабинин Д. А.* Физиологические основы питания растений. М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 11. *Сливинская Р. Б.* Никель в растениях. — *Тр. 3-й конф. молод, ботан. Ленинграда.* — Л.: Ботан. ин-т АН СССР, 1990, ч. 4, с. 114-121. — 12. *Тихомиров Ф. А., Кузнецова Н. Н., Магина Л. Г.* Действие никеля на растения на дерново-подзолистой почве. — *Агрохимия*, 1987, № 8, с. 74-80. — 13. *Ягодин Б. А., Говорина В. В., Виноградова С. Б. и др.* Особенности накопления и распределения никеля в растениях овса. — *Изв. ТСХА*, 1998, вып. 1,

- c. 133-140. — **14.** *Cataldo D. A., Garland T. R., Wildung R. E., Drucker H.* Plant Physiol, 1978, vol. 62, p. 566-570. — **15.** *Guo Y.* Genotypic Differences in Uptake and Translocation of Cadmium and Nickel in different Plant Species. Stuttgart: Verlag Ulrich
- E. Grauer, 1995. — **16.** *Neumann P. M., Channel A.* Plant Physiol, 1986, vol. 81, N 2, p. 689-691. — **17.** *Othmar H.* — Phyton., 1985, Bd. 25, N 1, s. 135-146. — **18.** *Poulik Z.* — Agriculture, Ecosystems and Environment, 1997, vol. 63, p. 25—29.

*Статья поступила
24 января 2001 г.*

SUMMARY

The data of the greenhouse experiments on accumulating and distributing nickel in beans in different stages of development are discussed. The close connection between the concentrations of nickel in soil and plants in all the stages of development has been established; the changes in accumulating biomass by this have not been observed. The accumulation of nickel by beans lasted during the whole vegetation period and was the highest to the time of the whole maturity. At the same time concentration of nickel in generative organs was higher than in vegetative ones. It is supposed, that nickel was being redistributed from roots and vegetative organs to beans during the yield maturity.