

НАКОПЛЕНИЕ КАДМИЯ В РАСТЕНИЯХ ГОРОХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ КАЛИЯ В СРЕДЕ

А.И. Соколик, В.М. Юркевич, Г.А. Мартынкевич

*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь
e-mail: sokolic@bsu.by*

Введение

На сегодняшний день все более остро стоит проблема тотального загрязнения, истощения и в целом ухудшения экологического состояния биосферы. Наибольшие опасения в процессе загрязнения воздуха, воды и почвы вызывают вещества, обладающие токсическим действием [1]. Они способны вызывать болезни и мутации у живых существ и мигрировать по цепи почва – растения – животные – человек. Среди многочисленных загрязнителей окружающей среды особое место занимают тяжелые металлы. К этой группе относят химические элементы, которые имеют плотность больше 5 г/см^3 и относительную атомную массу более 40 Да [2]. К ним относятся свинец, цинк, кадмий, ртуть, молибден, марганец, никель, олово, кобальт, хром, медь и другие. Считается, что именно тяжелые металлы являются наиболее токсичными для живых организмов. Интенсивное развитие современной промышленности и сельского хозяйства неизбежно сопровождается возрастанием их содержания в окружающей среде [3].

Основной источник поступления тяжелых металлов в окружающую среду – техногенный, он связан с интенсивным развитием современной промышленности: угледобывающей, металлургической, химической, энергетической. Загрязнение воздуха происходит при сжигании угля и других горючих ископаемых, а также вызвано выбросами промышленных предприятий. Причем, если загрязнение от промышленных предприятий, как правило, носит локальный характер, то выбросы при сжигании топлива распространяются повсеместно [4]. Основная часть (60–80%) от выбросов кадмия, цинка и меди приходится на предприятия по переработке руд.

Среди антропогенных источников поступления тяжелых металлов в почву значительную роль играют и агротехнические мероприятия: внесение удобрений, пестицидов и орошение [5]. Содержание кадмия в минеральных удобрениях колеблется от 0.3 до 179 мг/кг [6]. Даже при относительно небольшом содержании кадмия в фосфорных удобрениях его ежегодное поступление в почву составляет величину порядка 10 г/га.

Опасность загрязнений, вызванных тяжелыми металлами, обуславливается как непосредственным токсическим действием их на живые объекты, так и способностью включаться в пищевые цепи, вплоть до человека. Основными биологическими аккумуляторами тяжелых металлов являются растения. Многие из них накапливают тяжелые металлы в концентрациях, во много раз превышающих концентрацию металлов в почве. Опасность металлов усугубляется еще и тем, что они в почве не разрушаются, содержание увеличивается и, следовательно, их опасность со временем только возрастает. Значительное увеличение содержания тяжелых металлов в окружающей среде сопровождается ростом их накопления в растениях. Растения разных видов способны по-разному накапливать тяжелые металлы.

Известно, что металлы-загрязнители, в частности, кадмий, поглощаются растением вместе с элементами минерального питания в ионной форме из почвенного раствора и обменной части почвенного поглощающего комплекса. В этом процессе участвуют расположенные на плазматической мембране поглощающих клеток корня механизмы ионного транспорта, включая ионные каналы разных видов и системы активного транспорта, использующие для переноса ионов в клетку энергию метаболизма [7]. Значительную роль в этом процессе играет мембранная разность электрических потенциалов, которая является

движущей силой перемещения катионов из раствора в клетку по каналам. Очевидно, что в такой системе минеральный состав среды может играть существенную роль как для скорости процессов входа ионов металла в клетку, так и для конечного уровня его накопления в растении.

Подобное влияние, известное как «калиевая терапия» хорошо изучено и применяется на практике для радионуклидного загрязнения сельскохозяйственных земель радиоцезием. В этом случае наблюдается значительный, в разы, эффект снижения загрязнения продукции растениеводства нуклидом при повышении уровня калия в почве. Однако для двухвалентного радиостронция эффективность калиевой терапии существенно меньше, но все же наблюдается [8].

В силу изложенного представляет интерес зарегистрировать параметры накопления кадмия в растениях гороха при варьировании уровней минерального питания в среде. Таким образом, в настоящей работе ставилась цель выявить закономерности распределения тяжёлого металла кадмия в проростках бобовых, (на примере гороха) и влияние на это одного из важных элементов минерального питания растений – содержания калия в среде.

Методы исследования

Выращивание проростков описано ранее [9]: через 10 дней после посадки проростки пересаживали из рулонов в стеклянные сосуды, содержащие (500–550 мл) либо питательный раствор Кнопа, либо приготовленные на его основе растворы с различным содержанием калия при постоянном уровне остальных минеральных элементов. Составы растворов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Состав питательных растворов для выращивания проростков. (Для удобства молярные концентрации умножены на 1000)

Варианты сред Ионы	1	2	2
K ⁺	1,7 KH ₂ PO ₄ 1,8 KCl 3,5	0,3 KCl 0,3	0,03 KCl 0,03
Ca ²⁺	3,1 Ca(NO ₃) ₂ 3,1	3,1 Ca(NO ₃) ₂ 1,7 CaHPO ₄ 4,8	3,1 Ca(NO ₃) ₂ 1,7 CaHPO ₄ 4,8
Mg ²⁺	2,1 Mg SO ₄ 2,1	2,1 Mg SO ₄ 2,1	2,1 Mg SO ₄ 2,1
Fe ³⁺	0,077 FeCl ₃ 0,077	0,077 FeCl ₃ 0,077	0,077 FeCl ₃ 0,077
H ₂ PO ₄ ⁻	1,7	1,7	1,7
NO ₃ ⁻	6,2	6,2	6,2

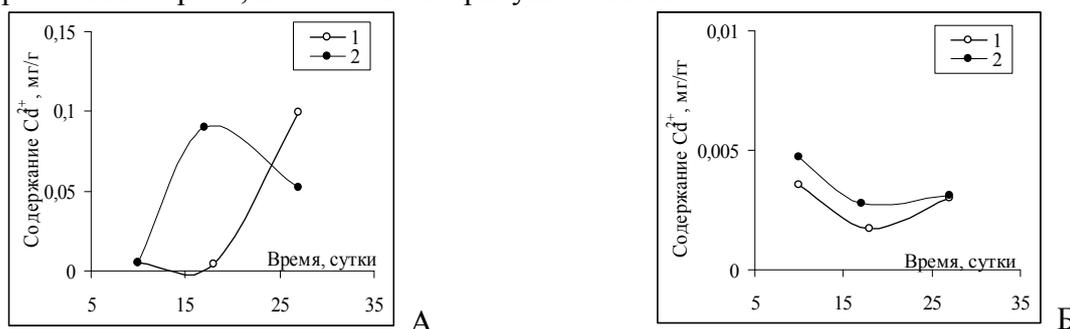
Концентрация кадмия была выбрана 10⁻⁷ моль/л на основе ранее проведенных экспериментов [9], чтобы металл не оказывали влияние на морфометрические характеристики (показатели роста) растений.

Исследуемые объекты (корни и надземную часть) высушивали в сухожаровом шкафу при температуре 60–70°C до воздушно-сухого состояния и постоянной массы. После этого материал измельчали и переносили в фарфоровые тигли, которые помещали в муфельную печь для озоления при постепенном повышении температуры до 450–500°C. При данных условиях пробы выдерживаются примерно 2–3 часа до приобретения золой постоянной массы, однородного цвета и структуры.

Далее осуществляли полное химическое разложение пробы в смеси концентрированных плавиковой и азотной кислот (HF:HNO₃ = 3:1; 10–15 мл на пробу). Состав пробы определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре «ZEE nit 700» фирмы «Analytik Jena». Для калибровки прибора использовали государственные стандартные образцы K, Ca, Cd и полученные из них методом разведения промежуточные растворы.

Результаты и обсуждение

В результате исследований были получены данные, отражающие динамику накопления кадмия в растениях гороха, показанные на рисунке 1 А и Б.



1 – проростки выращивали на среде 2, с уровнем калия 0,3 ммоль/л
 2 – проростки выращивали на среде 3, с уровнем калия 0,03 ммоль/л
 Рисунок 1 – Содержание кадмия в золе корней (А) и в золе надземной части (Б) растений гороха

Видно, что характер накопления металла в корне зависит от уровня калия в среде выращивания растений. Так, в условиях 0,3 ммоль/л калия после 10-и дней экспозиции наблюдали небольшой и не очень быстро возрастающий уровень кадмия, затем на 18-е сутки накопление ускориалось и к 26-м достигало максимума. При понижении уровня калия до 0,03 ммоль/л быстрая фаза накопления начиналась значительно раньше, к 10-м суткам, и далее скорость накопления металла, которую можно оценить по наклону кривой к оси времени, заметно возрастала.

В надземной части растения ситуация существенно иная. При обоих уровнях калия в среде выращивания достигнутая к 10-м суткам величина накопления металла больше не увеличивалась и не сильно отличалась для обоих вариантов.

Далее с целью выяснения механизмов поступления и накопления кадмия в растениях гороха был проведен анализ роста корней и надземной части растений в зависимости от уровня калия в питательной среде.

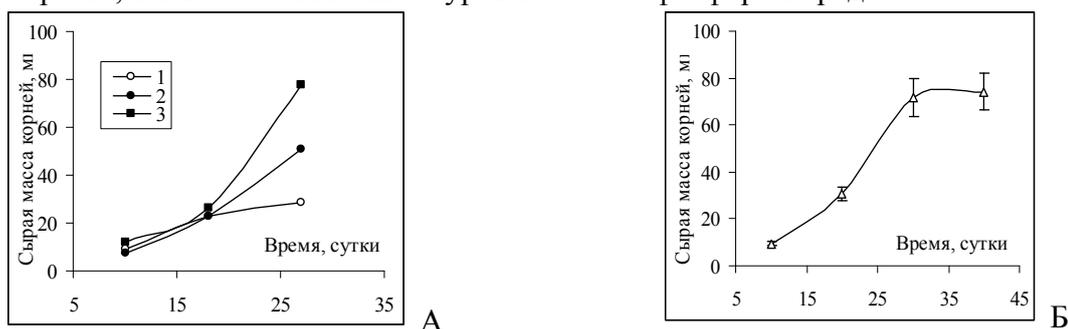
Влияние калия на показатели роста проростков гороха. Данные по величине сырой массы корней и надземной части проростков, выросших на средах 1, 2 и 3, приведены на рисунках 2 и 3. Для эксперимента были взяты проростки в следующем количестве: рост в течении 10 суток – 150 штук, 18–20 суток – 70 штук, 27–30 суток – 25 штук, для того, чтобы обеспечить одинаковую точность определения массы. Далее приведена средняя масса корней и надземной части в расчете на 1 проросток.

Сравнение вариантов выращивания в полной среде Кнопа (зависимость 1 на рисунке 2 А) и в разбавленной среде 1/5 Кнопа (рисунок 2 Б) показывает, что в полной среде скорость роста корней за первые 18–20 час ниже на 35%, чем в пятикратно разбавленной. По данным, приведенным на рисунке 2 А, наблюдается зависимость скорости роста корней от концентрации калия, причем только начиная с 18-20 суток при снижении уровня калия рост ускоряется в 4 раза. При сходной концентрации калия (0,3–0,6 ммоль/л) в среде 1/5 Кнопа скорость роста к 28–30 суткам в 2 раза выше по сравнению с полной средой.

Что касается скорости роста надземной части растения, по данным, приведенным на рисунке 3, видно, что скорость роста в полной среде Кнопа (зависимость 1 на рисунке 3 А) по сравнению с вариантом разбавленной в 5 раз среды скорость роста за первые 18–20 час выше в 2 раза, как и величина массы, достигнутая к 28 суткам роста.

Таким образом, в изученном диапазоне концентрации калия и для продолжительности выращивания до 30 суток наблюдается зависимость роста от содержания калия – меньше калия, быстрее рост, но для надземной части эта зависимость значительно слабее, чем для корней. В то же время при сравнении вариантов среда 2 и 1/5 Кнопа при практически

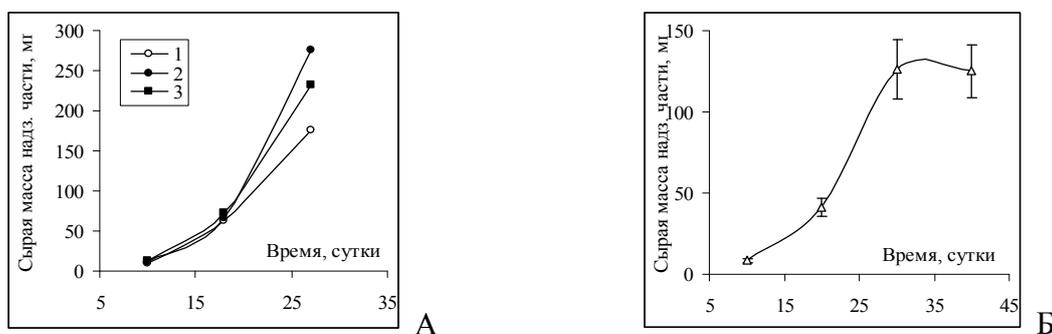
одинаковой концентрации калия (0,3–0,6) скорость роста к 28–30 суткам в последнем случае в 2,5 раза ниже, также ниже значение результирующей массы. В этом случае очевидно торможение роста, вызванное снижением уровня азота и фосфора в среде.



А – При выращивании на средах 1 (полная среда Кнопа, 3,5 моль/л калия), 2 (среда Кнопа с пониженным до 0,3 ммоль/л уровнем калия)) и 3 (среда Кнопа с пониженным до 0,03 ммоль/л уровнем калия)

Б – Среда 1/5 Кнопа

Рисунок 2 – Динамика сырой массы корней гороха в расчете на 1 проросток при выращивании в разных минеральных условиях

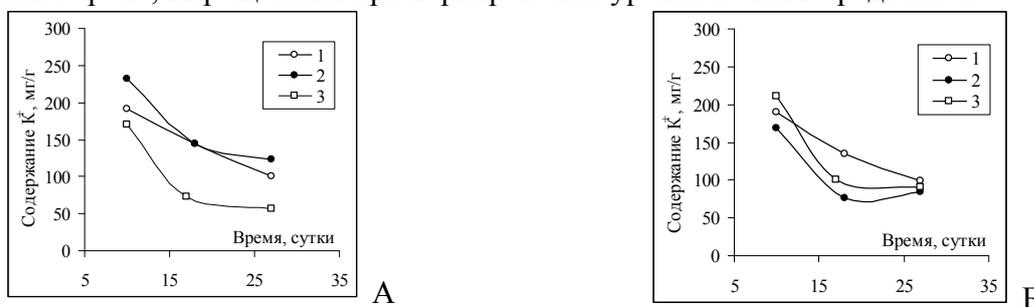


А – При выращивании на средах 1 (полная среда Кнопа, 3,5 моль/л калия), 2 (среда Кнопа с пониженным до 0,3 ммоль/л уровнем калия)) и 3 (среда Кнопа с пониженным до 0,03 ммоль/л уровнем калия)

Б – Среда 1/5 Кнопа

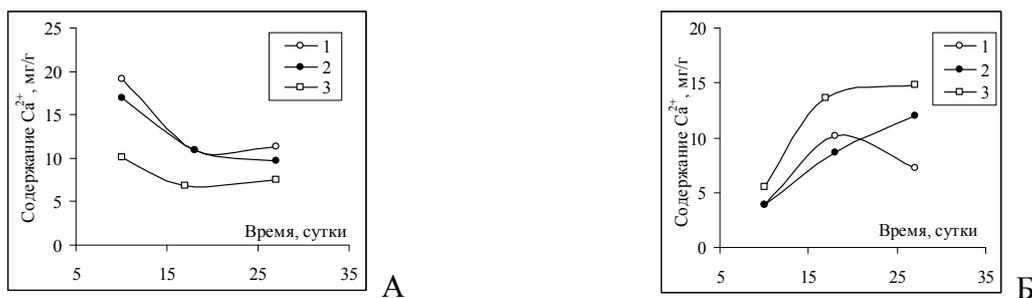
Рисунок 3 – Динамика сырой массы надземной части гороха в расчете на 1 проросток при выращивании в разных минеральных условиях

Влияние калия на содержание макроэлементов в проростках гороха. На рисунках 4 и 5 приведены данные по содержанию калия и кальция в золе корней и надземной части растений гороха, выращенных при варьировании уровня калия в среде Кнопа.



1, 2 и 3 означают варианты выращивания на средах 1 (полная среда Кнопа, 3,5 моль/л калия), 2 (среда Кнопа с пониженным до 0,3 ммоль/л уровнем калия)) и 3 (среда Кнопа с пониженным до 0,03 ммоль/л уровнем калия)

Рисунок 4 – Содержание калия в золе корней (А) и надземной части растений гороха (Б) в расчете на 1 проросток при выращивании в разных минеральных условиях



1, 2 и 3 аналогичны обозначениям на рисунке 4

Рисунок 5 – Содержание кальция в золе корней (А) и надземной части растений гороха (Б) в расчете на 1 проросток при выращивании в разных минеральных условиях

Видно, что уровень калия в корнях заметно снижается только при его уменьшении в среде в 100 раз по сравнению с нормальным. Для надземной части содержание калия в золе практически не зависит от его уровня в среде.

По зависимостям, показанным на рисунке 5 А видно, что уровень кальция в корнях заметно снижается только при уменьшении в среде содержания калия в 100 раз по сравнению с нормальным. Можно отметить подобие динамики накопления калия и кальция в корнях гороха: для обоих минеральных элементов происходит снижение первоначального уровня во всех средах с относительной стабилизацией к 18-ти суткам.

Содержание кальция в золе надземной части до 18 суток практически не зависит от уровня калия в среде. Зато к 30-м суткам по мере возрастания уровня калия в среде уменьшается содержание кальция в надземной части.

Выводы

Таким образом, представленные результаты показывают, что при пониженной концентрации калия в среде выращивания проростков гороха начальная скорость накопления кадмия в корнях невелика, но к 18-ти суткам существенно возрастает, то есть наблюдается своеобразная «задержка». При десятикратном понижении уровня калия в среде скорость накопления металла возрастает гораздо раньше и до большего значения: «задержка» исчезает.

Уровень накопления кадмия в надземной части проростков гороха в 20 раз меньше, чем в корнях, и практически не зависит от уровня калия в среде.

Накопление кадмия в корнях и надземной части проростков гороха не коррелирует с накоплением как калия, так и кальция при варьировании содержания калия в среде выращивания.

Список литературы

1. Foy, C.D. The physiology of metal toxicity in lands / C.D. Foy, R.L. Chaney, M.C. White // *Annu. Rev. Plant. Physiol.* – 1978. – № 29. – P. 511–566.
2. Кузнецов, Вл.В. Физиология растений / Вл.В. Кузнецов, Г.А. Дмитриева. – М.: Высшая школа. Изд. 2-е, 2006. – 742 с.
3. Sanità di Toppi, L. Response to cadmium in higher plants / L. Sanità di Toppi, R. Gabbrielli // *Environ. Exp. Bot.* – 1999. – Vol. 41. – P. 105–130.
4. Барсукова, В.С. Физиолого-генетические аспекты устойчивости растений к тяжелым металлам / В.С. Барсукова // Аналитический обзор. – Новосибирск, 1997. – 63 с.
5. Cadmium accumulation in crops / C.A. Grant [et al.] // *Can. J. Plant Sci.* – 1998. – Vol. 78. – P. 1–17.
6. Серегин, И.В. Передвижение ионов кадмия и свинца по тканям корня / И.В. Серегин, В.Б. Иванов // *Физиология растений.* – 1998. – Т. 45, № 6. – С. 899–905.
7. White, P.J. Mechanisms of caesium uptake by plants / P.J. White, M.R. Broadley // *New Phytologist.* – Vol. 147 (2). – P. 241–256.
8. Путятин, Ю.В. Минимизация поступления радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в растениеводческую продукцию / Ю.В. Путятин // Минск, 2008. – 267 с.
9. Особенности реакции корневой системы растений на тяжелые металлы / А.И. Соколик [et al.] // *Труды БГУ.* – 2009. – Т. 4, ч. 1. – С. 86–94.