

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА В СЕГМЕНТАХ *PETROSELINUM CRISPUM* В УСЛОВИЯХ ПРИКОРНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Александра ПЕШКОВА^{1,2*}

¹ Отделение ядерной физики, Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия
² Докторская школа биологических, геонаучных, химических и технологических наук, Государственный университет Молдовы, MD-2028 Кишинев, Молдова

*Ответственный автор: Александра Пешкова, peshkova.alexandra92@gmail.com

Научный руководитель: Чепой Лилиана, кандидат биол. наук, Институт микробиологии и биотехнологии
Технического университета Молдовы

Аннотация. Актуальность изучения влияния наночастиц металлов на различные биологические объекты и возможное воздействие на здоровье человека обусловлена активным применением наночастиц в различных сферах. Поступление наночастиц в атмосферный воздух, перенос со сточными водами способствуют загрязнению как водных, так и наземных экосистем. В настоящем исследовании растения петрушки (*Petroselinum crispum*) были использованы в качестве тест-объектов для изучения особенностей накопления и переноса наночастиц золота (AuNPs) в сегменты растений в условиях прикорневого воздействия. Содержание золота в почвенных и растительных образцах было определено с помощью ИСП-МС. Результаты работы позволяют сделать выводы о доступности для растений наночастиц золота, диаметром 1-5 нм. В ходе исследования выявлены различия в аккумуляции золота в корнях и листьях петрушки в зависимости от концентрации используемых растворов.

Ключевые слова: наночастицы золота, токсичность, петрушка кудрявая, ИСП-МС

Введение

Благодаря уникальным электрическим, оптическим и механическим свойствам наночастицы металлов представляют особый интерес для различных сфер деятельности. Наноразмерные материалы используются в различных отраслях промышленности, медицине, в электронике, нефтяной отрасли [1–6]. Наночастицы золота находят применение в медицинской практике, в частности, имеют важное значение в области лечения и диагностики рака. Их применяют в качестве контрастного агента для визуализации опухолей, усилителя лучевой терапии и для целевой доставки лекарственных препаратов [7–10]. Широкое применение наноматериалов в различных отраслях способствует поступлению наночастиц в окружающую среду. Выбросы в атмосферный воздух, перенос и осаждение наночастиц на поверхности суши и водоемах, способствует загрязнению почвы, донных отложений, растительности. Частицы в твердых отходах, сточных водах или случайных разливах могут переноситься в водные системы ветром или дождевыми стоками. Таким образом воздействие наночастицами может осуществляться на любой компонент экосистемы [11]. Исследование токсичности наночастиц металлов для различных групп организмов, особенности аккумуляции в почвах, возможность транслокации в сегменты растений, а также перенос с одного трофического уровня на другой является крайне актуальным. Токсикологическая активность наночастиц для растений и особенности поглощения корневой системой зависит от множества факторов, таких как физико-химические свойства наноматериалов, размер частиц, вид растительного объекта [12, 13]. Ряд исследований свидетельствуют о том, что вещества в форме наночастиц обладают особыми свойствами, а также высокой проникающей способностью в растительные объекты [14].

Растения, применяемые в лекарственных целях и пищевой промышленности являются важными объектами для исследований. Одним из таких растений является петрушка кудрявая (*Petroselinum crispum*), корни и листья которой используются для лечения заболеваний ЖКТ, почек, мочевыводящих путей. Ряд лекарственных препаратов применяется для уменьшения внутренних воспалительных процессов. Также, петрушка активно используется в качестве приправы и употребляется в свежем виде [15, 16]. Исследование поглощения наночастиц золота растениями, проводимые в условиях гидропоники, свидетельствуют о биодоступности наночастиц с широким диапазоном размеров. Однако, результаты могут отличаться для почвенных условий [17].

Целью работы является изучение влияния различных концентраций наночастиц золота (покрытых ПВП) на накопление в сегментах петрушки, в условиях прикорневого воздействия.

Материалы и методы

Для изучения особенностей накопления наночастиц золота в сегментах растений *Petroselinum crispum*, выращенных в почвенном грунте, был проведен 10-дневный эксперимент. Воздействие растворами наночастиц осуществлялось 1 раз в 2 дня, где за один полив в прикорневую часть вносилось 10 мл раствора в концентрации 1, 5, 10, 50, 100, 200 мг/л. Контрольные растения поливали по аналогичной схеме деионизованной водой.

В эксперименте использовался грунт, произведенный компанией Неваторф, марки Terra Vita (Россия). Согласно данным производителя, данный субстрат имеет в составе торф верховой различной степени разложения, биогумус, намывной песок, агроперлит, муку известняковую, комплексное минеральное удобрение марка А, магний сернокислый марка В, калий сернокислый. рН солевой суспензии 6-6.5. Семена петрушки кудрявой (*Petroselinum crispum*) были приобретены в агрофирме «Поиск» (Россия). Наночастицы золота, покрытые поливинилпирролидоном (ПВП) - в компании М9 (Тольятти, Россия).

По окончании эксперимента, с каждого растения были отобраны листья, корневая часть и почва. Пробоподготовка состояла из нескольких этапов, в которую входило высушивание при 50 °С, измельчение, высушивание при 105 °С. Для перевода образцов в растворенное состояние была использована смесь азотной кислоты и перекиси водорода в соотношении 3:1.

Определение содержания золота в почвенных и растительных образцах проводилось с помощью ИСП-МС в Институте проблем технологии микроэлектроники и особых чистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН). Размеры и форма наночастиц золота были определены с помощью ПЭМ в лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ).

Обсуждение результатов

Изображение, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии, свидетельствует о том, что наночастицы имеют сферическую форму, диапазон размеров составляет от 1 до 5 нм (рис.1).

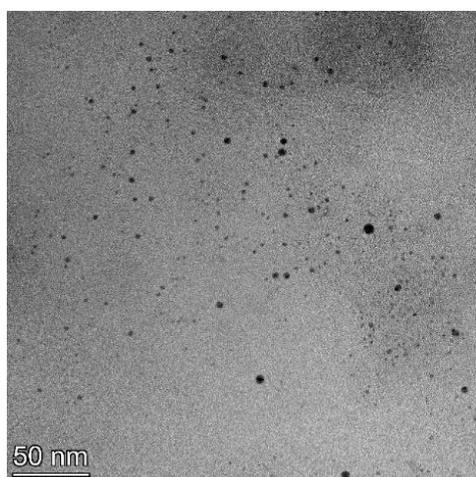


Рисунок 1. ПЭМ-изображение наночастиц золота

Измерения, проведенные с помощью ИСП-МС, позволили определить концентрацию AuNPs в образцах почвы и растений, погрешность измерений составляет менее 3%. Содержание золота в почвах контроля было ниже предела обнаружения (<0,046 мг/кг), в корнях контрольных растений на уровне 0,07 мг/кг, в листьях 0,16 мг/кг (табл.1).

Таблица 1

Содержание золота в почве и сегментах *Petroselinum crispum*

Концентрация растворов наночастиц, мг/л	Содержание золота в образцах, мг/кг		
	Почва	Корни	Листья
0	<0.046	0.07	0.16
1	1.85	2.22	0.45
5	7.90	8.20	4.93
10	6.08	19.51	17.52
50	6.03	14.56	13.96
100	4.64	28.22	29.31
200	108.15	45.08	52.95

В зависимости от концентрации использованных растворов, содержание золота в почвах превышало контрольные значения в 40-2351 раз, в корнях в 33-666 раз, в листьях в 3-328 раз. В ходе 10-дневного опыта не было выявлено ухудшения состояния экспериментальных растений, несмотря на накопление AuNPs в различных частях петрушки. При обработке растений раствором с концентрацией наночастиц золота 1 мг/л содержание золота в корнях было почти в 5 раз выше, чем в листьях, при концентрации 5 мг/л – перенос в надземную часть увеличился, но всё же содержание золота в корнях оказалось в 2 раза выше. При использовании растворов AuNPs с концентрацией 10, 50, 100 мг/л, содержание золота в корневой системе примерно соответствовало концентрации в листьях, при этом содержание в почвах было в 2-3 раза ниже, чем в сегментах растений. В целом, содержание золота в почвах снижалось по мере увеличения концентраций растворов наночастиц, а перенос в надземную часть увеличивался.

Полученные результаты согласуются с данными других авторов, согласно которым наночастицы золота накапливались корневой системой растений и переносились в надземные части. Ряд исследователей продемонстрировали различия в накоплении и биодоступности наночастиц золота в условиях гидропоники для пшеницы и табака. Накопление наночастиц золота покрытых таннатом или цитратом, диаметром 10, 30 и 50 нм, наблюдалось в растениях табака, в то время как аккумуляции ни при какой обработке пшеницы не выявлено [18]. В другой работе, проведенной с табаком, описана способность наночастиц золота, размером 3.5 нм проникать в растения через корневую систему и оказывать токсическое действие после 14 дней воздействия [19]. Исследования, проведенные с использованием табака (*Nicotiana tabacum* L. cv Xanthi) и табачного червя (*Manduca sexta*), позволили выявить возможности переноса наночастиц золота с одного трофического уровня на другой, а также способность к биомагнификации [20].

Выводы

Результаты, полученные в ходе 10-дневного эксперимента, позволили сделать выводы о биодоступности наночастиц золота, размером 1-5 нм для петрушки кудрявой. Содержание золота в корнях и листьях петрушки увеличивалось при повышении концентрации растворов наночастиц. Несмотря на то, что содержание золота в экспериментальных растениях превышало его содержание в контроле в десятки и сотни раз, петрушка демонстрировала устойчивость к загрязнению и способность к очищению почвы от наночастиц золота. Аккумуляция наночастиц золота в сегментах петрушки вызывает необходимость дальнейшего изучения влияния наноматериалов на растительные объекты, взаимодействия с почвенными микроорганизмами, а также перенос на другие трофические уровни.

Благодарность. Выражается благодарность Зиньковской Инге и Чепой Лилиане Ефимовне за помощь и советы в ходе написания статьи, Карандашеву Василию Константиновичу за проведение измерений на ИСП-МС, а также Сохацкому Александру Станиславовичу за проведение электронной микроскопии.

Список литературы

1. Tao, B. et al. Copper-nanoparticle-embedded hydrogel for killing bacteria and promoting wound healing with photothermal therapy. In: *Journal of Materials Chemistry B*, 2019, 7 (15), pp. 2534–2548. doi: 10.1039/C8TB03272F.
2. Zhang, X. et al. Nanocomposite Membranes Enhance Bone Regeneration Through Restoring Physiological Electric Microenvironment. In: *ACS Nano*, 2016, 10(8), pp. 7279–7286. doi: 10.1021/acsnano.6b02247.
3. Musa, M., Ponnuraj, K. T., Mohamad, D., and Rahman, I. A. Genotoxicity evaluation of dental restoration nanocomposite using comet assay and chromosome aberration test. In: *Nanotechnology*, 2013, 24(1). doi: 10.1088/0957-4484/24/1/015105.
4. Rubilar, O., Rai, M., Tortella, G., Diez, M. C., Seabra, A. B., and Durán, N. Biogenic nanoparticles: Copper, copper oxides, copper sulphides, complex copper nanostructures and their applications. In: *Biotechnology Letters*, 2013, 35 (9), pp. 1365–1375. doi: 10.1007/S10529-013-1239-X.
5. Genedy, M., Kandil, U. F., Matteo, E. N., Stormont, J., and Reda Taha, M. M. A new polymer nanocomposite repair material for restoring wellbore seal integrity. In: *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 58, pp. 290–298. doi: 10.1016/j.ijggc.2016.10.006.
6. Li, Y., Liang, J., Tao, Z., and Chen, J., CuO particles and plates: Synthesis and gas-sensor application. In: *Materials Research Bulletin*, 2008, 43 (8–9), pp. 2380–2385, doi: 10.1016/j.materresbull.2007.07.045.
7. Zhang, Q., Iwakuma, N., Sharma, P., Moudgil, B. M., Wu, C., McNeill, J., Jiang, H., and Grobmyer, S. R. Gold nanoparticles as a contrast agent for invivo tumor imaging with photoacoustic tomography. In: *Nanotechnology*, 2009, 20 (39), doi: 10.1088/0957-4484/20/39/395102.
8. Zhang, M., Shao, S., Yue, H., Wang, X., Zhang, W., Chen, F., Zheng, L., Xing, J., and Qin, Y. High stability Au NPs: From design to application in nanomedicine. In: *International Journal of Nanomedicine*, 2021, 16, pp. 6067–6094, doi: 10.2147/IJN.S322900.
9. Chithrani, D. B., Dunne, M., Stewart, J., Allen, C., and Jaffray, D. A. Cellular uptake and transport of gold nanoparticles incorporated in a liposomal carrier. In: *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 2010, 6 (1), pp. 161–169, doi: 10.1016/j.nano.2009.04.009.
10. Paciotti, G. F., Myer, L., Weinreich, D., Goia, D., Pavel, N., McLaughlin, R. E., and Tamarkin, L. Colloidal gold: A novel nanoparticle vector for tumor directed drug delivery. In: *Drug delivery*, 2004, 11 (3), pp. 169–183, doi: 10.1080/10717540490433895.
11. Klaine, S. J., Alvarez, P. J. J., Batley, G. E., Fernandes, T. F., Handy, R. D., Lyon, D. Y., Mahendra, S., McLaughlin, M. J., and Lead, J. R. Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability, and effects. In: *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 2008, 27 (9), pp. 1825–1851, doi: 10.1897/08-090.1.
12. Monica, R. C. and Cremonini, R. Nanoparticles and higher plants. In: *Caryologia*, 2009, 62 (2), pp. 161–165, doi: 10.1080/00087114.2004.10589681.
13. Masarovicová, E. and Králová, K. Metal nanoparticles and plants. In: *Ecological Chemistry and Engineering S.*, 2013, 20 (1), pp. 9–22, doi: 10.2478/eces-2013-0001.
14. López-Moreno, M. L., de la Rosa, G., Cruz-Jiménez, G., Castellano, L., Peralta-Videa, J. R., and Gardea-Torresdey, J. L. Effect of ZnO nanoparticles on corn seedlings at different temperatures; X-ray absorption spectroscopy and ICP/OES studies. In: *Microchemical Journal*, 2017, 134, pp. 54–61, doi: 10.1016/j.microc.2017.05.007.
15. Kuete, V. *Medicinal spices and vegetables from Africa: therapeutic potential against metabolic, inflammatory, infectious and systemic diseases*. Academic Press, 2017.

16. Marthe F. Petroselinum crispum (Mill.) Nyman (Parsley). In: *Medicinal, Aromatic and Stimulant Plants*, 2020, pp. 435–466. doi: 10.1007/978-3-030-38792-1_13.
17. Kumar, N., Tripathi, P., and Nara, S. Gold Nanomaterials to Plants: Impact of Bioavailability, Particle Size, and Surface Coating. In: *Nanomaterials in plants, algae, and microorganisms*, 2018, 1, pp. 195–220, doi: 10.1016/B978-0-12-811487-2.00009-8.
18. Judy, J. D., Unrine, J. M., Rao, W., Wirick, S., and Bertsch, P. M. Bioavailability of gold nanomaterials to plants: importance of particle size and surface coating. In: *Environmental science & technology*, 2012, 46 (15), pp. 8467–8474, doi:10.1021/es3019397
19. Sabo-Attwood, T., Unrine, J. M., Stone, J. W., Murphy, C. J., Ghoshroy, S., Blom, D., Bertsch, P. M., and Newman, L. A. Uptake, distribution and toxicity of gold nanoparticles in tobacco (*Nicotiana xanthi*) seedlings. In: *Nanotoxicology*, 2012, 6 (4), pp. 353–360, doi: 10.3109/17435390.2011.579631.
20. Judy, J. D., Unrine, J. M., and Bertsch, P. M., Evidence for biomagnification of gold nanoparticles within a terrestrial food chain. In: *Environmental science & technology*, 2011, 45 (2), pp. 776–781, doi: 10.1021/es103031a.