

УДК 632.122.1:546.57:631.445.41

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОТОКСИЧНОСТИ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ ЕГО ЗАГРЯЗНЕНИИ НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА[§]

© 2024 г. Н. И. Цепина¹, С. И. Колесников¹, Т. В. Минникова^{1,*}, А. С. Русева¹¹Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Иванковского
просп. Стачки, 194/1, Ростов-на-Дону 344090, Россия

*E-mail: loko261008@yandex.ru

Изучили динамику показателей фитотоксичности (всхожести и длины корней редиса) чернозема обыкновенного при загрязнении наночастицами серебра. В лабораторных условиях чернозем обыкновенный загрязняли наночастицами серебра (1, 10 и 100 мг/кг) в течение 3, 10, 30, 90 и 180 сут. Установлено, что чем больше было внесено наночастиц серебра в почву, тем сильнее было снижение всхожести и длины корней редиса. Восстановления всхожести и длины корней редиса с увеличением срока от момента загрязнения не происходило. В настоящем исследовании максимальный токсичный срок от момента загрязнения для каждого показателя был выявлен по его чувствительности к наночастицам серебра и информативности. Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к длине корней и всхожести редиса отмечена на 10-е и 30-е сут соответственно. Результаты можно использовать при оценке фитотоксичности почв, загрязненных наночастицами серебра.

Ключевые слова: почвы, загрязнение, наночастицы серебра, биотестирование, всхожесть, длина корней, редис.

DOI: 10.31857/S0002188124070107, **EDN:** CFIYVS

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность развития нанотехнологий способствует увеличению потребления наночастиц серебра (AgNPs) в различных сферах жизни человека и в последующем поступлении с отходами в окружающую среду [1]. Наночастицы серебра содержатся в таких потребительских товарах, как одежда, обувь, средства личной гигиены, косметика и др. [2]. Наночастицы серебра часто применяют в сельском хозяйстве поскольку входят в состав удобрений и нанопестицидов [3–5]. Прямой контакт AgNPs с корнями растений может привести к их поглощению и транспортировке к наземным органам растения: побегам, стеблям и листьям [6]. Растения, растущие на почвах, содержащих от 8 до 126 мг серебра/кг [7, 8], способны накапливать данный элемент в корневой системе и побегах [9].

Во многих исследованиях показано, что экотоксичность серебра проявляется в ингибировании почвенных бактерий [11–13] и снижении численности животных [13], а также уменьшении длины

корней и побегов растений [14–17], ингибировании активности почвенных ферментов [12, 18–20]. В большинстве исследований дана оценка экотоксичности AgNPs в зависимости от их концентрации. Публикации, посвященные изменению фитотоксических показателей почв в зависимости от срока загрязнения, в литературе не встречаются.

Было актуальным установить закономерности изменения состояния показателей фитотоксичности почвы в зависимости от времени от момента загрязнения AgNPs почвы (3, 10, 30, 90 и 180 сут). Цель работы – исследование динамики показателей фитотоксичности чернозема обыкновенного при его загрязнении наночастицами серебра.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования были выбраны черноземы обыкновенные – Naplic Chernozems Calcic [21]. Черноземы обыкновенные играют огромную роль в производстве сельскохозяйственной продукции, и снижение их плодородия в результате загрязнения крайне нежелательно. Образцы почвы для модельных лабораторных исследований были отобраны из поверхностного слоя (Апах – слой 0–20 см) почвы на пашне опытного

[§]Исследование выполнено при государственной поддержке гранта Российского научного фонда № 22-74-00054 в Южном федеральном университете.

участка Ботанического сада Южного федерального университета, (г. Ростов-на-Дону, Россия), координаты 47°14'17.54" с.ш., 39°38'33.22" в.д. Почва имеет тяжелосуглинистый гранулометрический состав, содержание гумуса, равное 4,4%, и нейтральную реакцию среды (рН 7,8 ед.). В данном исследовании рН определяли в водной вытяжке (почва : вода = 1 : 2,5). В инкубационные сосуды закладывали почву после просеивания через сито с диаметром отверстий от 3 до 5 мм. Наночастицы Ag вносили в виде сухого порошка. Порошок наночастиц серебра добавляли к небольшому количеству почвы и тщательно растирали, а потом соединяли с базовой массой образца. В пластиковые контейнеры объемом 500 мл в 3-кратной повторности вносили по 300 г почвы с наночастицами Ag.

В исследовании были использованы наночастицы серебра (AgNPs) (CAS7440-22-4) производства Alfa Aesar by Thermo Fisher Scientific (Германия) размером 10 нм в виде порошка, форма частиц – сферическая. Химическая чистота AgNPs составляла ≈99,99%. Данные характеристики AgNPs заявлены производителем.

Моделирование загрязнения AgNPs чернозема обыкновенного происходило в лабораторных условиях. Согласно литературным данным, серебро достаточно часто поступает в окружающую среду именно в форме наночастиц [22], а его содержание в почвах составляет от 0,01 до 126 мг/кг [8]. Размер частиц AgNPs, поступающих в окружающую среду, чаще всего составляет 10–20 нм [23]. В настоящем исследовании использовали поверхностный слой почвы (0–20 см) для оценки влияния наночастиц серебра на фитотоксические показатели чернозема обыкновенного. Серебро аккумулируется именно в этом слое. На основе фоновых концентраций серебра были рассчитаны дозы AgNPs, которыми загрязняли почву (1, 10 и 100 мг/кг).

Фоновое содержание серебра в черноземе обыкновенном составляет 0,1 мг/кг, его диагностировали методом масс-спектрометрии индуктивно связанной плазмы (ИСП-МС), на приборах ELAN-DRC-e или Agilent 7700-ФГУП во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского.

Почву инкубировали в вегетационных сосудах в 3-кратной повторности в климатической камере KBW Binder в течение 30 сут. Ранее, для серебра именно на этом сроке показана самая высокая токсичность [24]. Масса почвы в каждом сосуде составляла 300 г. В климатической камере были созданы благоприятные условия для роста и развития растений: влажность 25–30%, температура 24–25 °С, смена освещения (день/ночь). В качестве тест-объекта для оценки фитотоксичности был выбран редис (*Raphanus sativus* L. var. *radicula*), сорт

“18 дней”, поскольку семена этого растения имеют небольшой запас питательных веществ и чувствительны к внешним воздействиям, в частности, к загрязнению тяжелыми металлами и нефтепродуктами, применению ремедиантов для повышения скорости биологических процессов и пр. [25–27]. Из каждого сосуда с черноземом обыкновенным, загрязненным различным количеством AgNPs отбирали по 40 г почвы в трехкратной повторности. Далее полученную навеску почвы помещали в чашки Петри, увлажняли до 60% ПВ и тщательно перемешивали до однородной консистенции. После этого высаживали в каждую чашку Петри по 20 семян редиса. Чашки Петри помещали в климатическую камеру KBW 240 (Binder) на 7 сут. В климатической камере были созданы оптимальные условия при контроле освещенности, влажности и температуры. Фитотестирование основывалось на сравнении показателей всхожести (шт.) и длины корней (мм) в опытных вариантах по сравнению с контролем [28]. Всхожесть и длина корней – это наиболее информативные показатели из широкого спектра показателей прорастания семян и интенсивности начального роста растений [29].

Чувствительность определяли по тому, как происходило снижение всхожести и длины корней редиса в почве с наночастицами серебра относительно незагрязненной почвы (контроля). Снижение показателя более чем на 50% относительно контроля определяет высокую чувствительность, от 50 до 75% – среднюю, от 75 до 100% – низкую. Информативность оценивали по величине коэффициента корреляции (r) между показателем и концентрацией серебра в почве. Если r варьировал от $-0,70$ до $-1,0$, то информативность была высокой, от $-0,70$ до $-0,40$ – средней, $<-0,40$ – низкой.

Для проверки полученных данных на достоверность был проведен дисперсионный анализ с последующим определением наименьшей существенной разницы (HCP_{05}).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На 90-е сут после внесения наночастиц серебра 1 мг/кг в чернозем обыкновенный наблюдали снижение всхожести редиса до 75% по сравнению со всхожестью в незагрязненной почве (табл. 1).

Доза наночастиц 10 мг/кг вызвала снижение всхожести на 3-, 10-, 30-, 90- и 180-е сут до 81, 87, 70, 64 и 73% относительно контроля соответственно. Доза наночастиц серебра 100 мг/кг вызвала уменьшение всхожести редиса до 53, 71, 42, 55 и 71% соответственно по сравнению с незагрязненной почвой.

Увеличение дозы наночастиц серебра в почве уменьшало всхожесть и длину корней редиса.

Таблица 1. Динамика фитотоксических свойств чернозема обыкновенного при загрязнении наночастицами серебра на примере тесе-культуры редиса, % от контроля

| Срок экспозиции, сут | Содержание Ag в почве, мг/кг | | | | |
|--------------------------|------------------------------|-----|----|-----|--------------------------|
| | контроль без загрязнения | 1.0 | 10 | 100 | <i>HCP</i> ₀₅ |
| Всхожесть редиса | | | | | |
| 3 | 100 | 92 | 81 | 53 | 9 |
| 10 | 100 | 92 | 87 | 71 | 9 |
| 30 | 100 | 93 | 70 | 42 | 10 |
| 90 | 100 | 75 | 64 | 55 | 8 |
| 180 | 100 | 92 | 73 | 71 | 9 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | | 12 | 11 | 13 | |
| Длина корней редиса | | | | | |
| 3 | 100 | 75 | 63 | 31 | 10 |
| 10 | 100 | 97 | 95 | 48 | 9 |
| 30 | 100 | 91 | 85 | 81 | 9 |
| 90 | 100 | 81 | 78 | 63 | 11 |
| 180 | 100 | 99 | 87 | 75 | 9 |
| <i>HCP</i> ₀₅ | | 10 | 12 | 13 | |

Это согласовалась с увеличением показателей фитотоксичности при росте количества внесенных в почву наночастиц серебра, которое было показано в работе [30]. Ранее был отмечен дозозависимый ингибирующий эффект наночастиц серебра на прорастание семян риса и последующий рост и развитие проростков [19], на морфометрические показатели пшеницы [31], на всхожесть и длину корней редиса [14]. Очевидного восстановления всхожести и длины корней редиса с увеличением срока от момента загрязнения не происходило. Как было установлено ранее, на 90-е сут после внесения в почву нитрата серебра наблюдали восстановление показателей проросших семян и интенсивности начального роста редиса [24].

Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к длине корней редиса отмечена на 10-е сут. Этот факт подтверждается высокой чувствительностью к загрязнению наночастицами серебра (снижение показателя до 80% от контроля) и высоким коэффициентом корреляции ($r = -1.00$) на данном сроке. Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к всхожести редиса отмечена на 30-е сут, что подтверждено снижением показателя до 69% от контроля и высоким коэффициентом корреляции ($r = -0.92$).

Ранее были получены схожие результаты наибольшей экотоксичности наносеребра на 10- и 30-е сут после загрязнения [24]. Наночастицы многих металлов (Ag, Au, CeO₂, CuO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, TiO₂, ZnO и др.) негативно влияют на фотосинтетический аппарат растений, что влечет изменение морфометрических показателей [32, 33]. В исследовании [34] было установлено, что наночастицы Ag

влияли на заболеваемость хлорозом листьев ряски (*Lemna minor*) и активность ферментов. На течение хлороза влиял период загрязнения наночастицами: именно через 14 сут установлено увеличение хлороза у растений, подвергшихся воздействию наночастицами Ag, и количества пораженных растений по сравнению с 7-ми сут. Наночастицы Ag индуцировали окислительный стресс в клетках, что приводило к ингибированию ферментативной активности как механизма самозащиты. Оценена фотохимическая эффективность фотосистемы листьев фасоли бобовой (*Vicia faba*) при воздействии наночастиц серебра (AgNP) диаметром 20, 51 и 73 нм [35]. Наночастицы Ag влияли на устьичную проводимость и ассимиляцию CO₂. Кроме того, AgNP индуцировали перепроизводство активных форм кислорода (АФК) в листьях фасоли.

AgNP могут отрицательно влиять на процесс фотосинтеза при накоплении в листьях, поскольку было обнаружено незначительное высвобождение Ag⁺ из наночастиц. Влияние наночастиц Ag размером 18 нм на фотосинтетический аппарат водоросли (*Chlorella vulgaris* Beijer) и растений овса (*Avena sativa* L.) также было установлено [36]. Величина EC₅₀ для овса по морфометрическим показателям (энергии прорастания, массы корней и проростков) варьировала от 7 до 20 мг Ag⁺/л соответственно. При этом наиболее чувствительным показателем к действию наночастиц Ag и его ионов (Ag⁺) была оптическая плотность суспензии водоросли, а самым чувствительным органом овса к воздействию наночастиц Ag – корневая система.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что чем больше была концентрация наночастиц серебра в почве, тем сильнее уменьшались всхожесть семян и длина корней тест-культуры редиса. Выявлено, что восстановления всхожести и длины корней редиса с увеличением срока от момента загрязнения не происходило. Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к длине корней редиса отмечена на 10-е сут после загрязнения. Этот факт подтверждался высокой чувствительностью к загрязнению наночастицами серебра (снижение показателя до 80% от контроля) и высоким коэффициентом корреляции ($r = -1.00$) на данном сроке. Максимальная токсичность наночастиц серебра по отношению к всхожести редиса отмечена на 30-е сут, что подтверждалось высокой чувствительностью к загрязнению наночастицами серебра (снижение показателя до 69% от контроля) и высоким коэффициентом корреляции ($r = -0.92$). Результаты исследования возможно использовать при оценке фитотоксичности почв, загрязненных наночастицами серебра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khanna V.K.* Nanomaterials and their properties // *Integrated Nanoelectronics*. New Delhi: Springer, 2016. P. 25–41.
2. *Oliveira C.R.S., Silva Júnior A.H., Immich A.P.S., Fiates J.* Use of advanced materials in smart textile manufacturing mater // *Lett.* 2022. V. 316. 132047.
3. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132047>
4. *Bhattacharyya A., Duraisamy P., Govindarajan M., Buhroo A.A., Prasad R.* Nano-biofungicides: emerging trend in insect pest control // *Adv. Applicat. Fungal Nanobiotechnol.* 2016. P. 307–319.
5. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42990-8_15
6. *Júniora J.A.H.S., Oliveira M.P.V., Oliveira C.R.S., Júnior F.W.* Reichert impacts of metallic nanoparticles application on the agricultural soils microbiota // *J. Hazard. Mater. Adv.* 2022. V. 7. 100103. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100103>
7. *Kaningini A.G., Nelwamondo A.M., Azizi S., Maaza M., Mohale K.C.* Metal nanoparticles in agriculture: A Review of possible use // *Coatings.* 2022. V. 12. 1586. <https://doi.org/10.3390/coatings12101586>
8. *Ahmadov I.S., Ramazanov M.A., Gasimov E.K., Rzayev F.H., Veliyeva S.B.* The migration study of nanoparticles from soil to the leaves of plants // *Bio-interface Res. Appl. Chem.* 2020. V. 10. P. 6101–6111. <https://doi.org/10.33263/BRIAC105.6101611>
9. *Kabata-Pendias A.* Trace elements in soils and plants. 4th Ed. Boca Raton, FL: Crc Presspp, 2010. 548 p.
10. *Huang Y.N., Qian T.T., Dang F., Yin Y.G., Li M., Zhou D.M.* Significant contribution of metastable particulate organic matter to natural formation of silver nanoparticles in soils // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. P. 4–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11643-6>
11. *Yildirim D., Sasmaz A.* Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey) // *J. Geochem. Explor.* 2017. V. 182. P. 228–234. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.005>
12. *Forstner C., Orton T.G., Wang P., Kopittke P.M., Dennis P.G.* Soil chloride content influences the response of bacterial but not fungal diversity to silver nanoparticles entering soil via wastewater treatment processing // *Environ. Pollut.* 2019. V. 255. 113274. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113274>
13. *Grün A., Straskraba S., Schulz S., Schloter M., Emerling C.* Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on microbial biomass, enzyme activity, and functional genes involved in the nitrogen cycle of loamysoil // *J. Environ. Sci.* 2018. V. 69. P. 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.04.013>
14. *Tsepina N., Kolesnikov S., Minnikova T., Timoshenko A., Kazeev K.* Soil contamination by silver and assessment of its ecotoxicity // *Rev. Agricult. Sci.* 2022. V. 10. P. 186–205. https://doi.org/10.7831/ras.10.0_186
15. *Makama S., Piella J., Undas A. Dimmers W.J., Peters R., Puntos V.F., van den Brink N.W.* Properties of silver nanoparticles influencing their uptake in and toxicity to the earthworm *Lumbricus rubellus* following exposure in soil // *Environ. Pollut.* 2016. V. 218. P. 870–878. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.016>
16. *Kolesnikov S., Tsepina N., Minnikova T., Kazeev K., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Mazarji M., Singh R.K., Rajput V.D.* Influence of silver nanoparticles on the biological indicators of Haplic Chernozem // *Plants.* 2021. V. 10. 1022. <https://doi.org/10.3390/plants10051022>
17. *Cvijetko P., Milošić A., Domijan A.-M., Vinković Vrček I., Tolić S., Peharec Štefanić P., Letofsky-Papst I., Tkalec M., Balen B.* Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2017. V. 137. P. 8–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.11.009>
18. *Thuesombat P., Hannongbua S., Akasit S., Chadchawan S.* Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2014. V. 104. P. 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.022>
19. *Vannini C., Domingo G., Onelli E., De Mattia F., Bruni I., Marsoni M., Bracale M.* Phytotoxic and genotoxic effects of silver nanoparticles exposure on

- germinating wheat seedlings // *J. Plant Physiol.* 2014. V. 171. P. 1142–1148.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.05.002>
20. Yan C., Huang J., Cao C., Li R., Ma Y., Wang Y. Effects of PVP-coated silver nanoparticles on enzyme activity, bacterial and archaeal community structure and function in a yellow-brown loam soil // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. V. 27. P. 8058–8070.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-07347-5>
 21. Ottoni C.A., Lima Neto M.C., Leo P., Ortolan B.D., Barbieri E., De Souza A.O. Environmental impact of biogenic silver nanoparticles in soil and aquatic organisms // *Chemosphere.* 2020. V. 239. 124698.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124698>
 22. Eivazi F., Afrasiabi Z., Jose E. Pedosphere effects of silver nanoparticles on the activities of soil enzymes involved in carbon and nutrient cycling // *Pedosphere.* 2018. V. 28. P. 209–214.
<https://doi.org/10.1016/S1002-7>
 23. World Reference Base for Soil Resources 2022. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, ISBN 979-8-9862451-1-9
 24. Michels C., Perazzoli S., Soares M. Inhibition of the enriched culture of ammonium-oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite // *Commun. Environ. Sci.* 2017. V. 586. P. 995–1002.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.080>
 25. Aznar R., Barahona F., Geiss O., Ponti J., Luis T.J., Barrero-Moreno J. Quantification and size characterisation of silver nanoparticles in environmental aqueous samples and consumer products by single particle-ICPMS // *Talanta.* 2017. V. 175. P. 200–208.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.07.048>
 26. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Sudina L.V., Minnikova T.V., Kazeev K. Sh., Akimenko Yu.V. Silver ecotoxicity estimation by the soils state biological indicators // *Appl. Environ. Soil Sci.* 2020. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1155/2020/1207210>
 27. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Исследование фитотоксичности свинца для растений редиса и салата при выращивании на разных типах почв // *Агрохимия.* 2019. № 6. С. 72–80.
<https://doi.org/10.1134/S0002188119030050>
 28. Минникова Т.В., Русева А.С., Колесников С.И., Ревина С.Ю., Гайворонский В.Г. Влияние биочара на экологическое состояние чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, бензином и мазутом // *Агрохимия.* 2022. № 9. С. 84–93.
<https://doi.org/10.31857/S0002188122090095>
 29. Минникова Т.В., Минин Н.С., Колесников С.И., Горюцов А.В., Чистяков В.А. Оценка фитотоксичности чернозема обыкновенного при применении *Vaccillus* sp. и биочара для стимуляции разложения пожнивных остатков озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // *Агрохимия.* 2023. № 5. С. 60–69.
<https://doi.org/10.31857/S0002188123050058>
 30. Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 248 с.
 31. Kolesnikov S.I., Yaroslavtsev M.V., Spivakova N.A., Kazeev K.Sh. Comparative assessment of the biological tolerance of chernozems in the South of Russia towards contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb in a model experiment // *Euras. Soil Sci.* 2013. V. 46. № 2. P. 176–181.
 32. Цепина Н.И., Колесников С.И., Минникова Т.В., Русева А.С. Сравнительная оценка фитотоксичности наночастиц серебра разного размера // *Агротех. вестн.* 2023. № 3. С. 80–85.
<https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-3-017>
 33. Lahuta L.B., Szablinska-Piernik J., Stałanowska K., Głowacka K., Horbowicz M. The Size-Dependent effects of silver nanoparticles on germination, early seedling development and polar metabolite profile of wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Inter. J. Mol. Sci.* 2022. V. 23. P. 13255.
<https://doi.org/10.3390/ijms232113255>
 34. Венжик Ю.В., Мошков И.Е., Дыкман Л.А. Влияние наночастиц металлов и их оксидов на фотосинтетический аппарат растений // *Изв. РАН. Сер. биол.* 2021. № 2. С. 137–152.
<https://doi.org/10.31857/S0002332921020144>
 35. Дыкман Л.А., Богатырёв В.А., Соколов О.И., Плотников В.К., Репко Н.В., Салфетников А.А. Взаимодействие наночастиц золота, серебра и магния с растительными объектами // *Политемат. сетев. электр. научн. журн. Кубан. ГАУ.* 2016. Т. 120. С. 675–705.
 36. Pereira S.P.P., Jesus F., Aguiar S., de Oliveira R., Fernandes M., Ranville J., Nogueira A.J.A. Phytotoxicity of silver nanoparticles to *Lemna minor*: Surface coating and exposure period-related effects // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 618. P. 1389–1399.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.275>
 37. Falco W.F., Scherer M.D., Oliveira S.L., Wender H., Colbeck I., Lawson T., Caires A.R.L. Phytotoxicity of silver nanoparticles on *Vicia faba*: Evaluation of particle size effects on photosynthetic performance and leaf gas exchange // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 701. P. 134816.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134816>
 38. Асанова А.А., Полонский В.И. Воздействие наночастиц серебра на фотосинтезирующие организмы // *Достиж. науки и техн. АПК.* 2017. Т. 31. № 8. С. 12–15.

Dynamics of Phytotoxicity Indicators of Ordinary Chernozem when it is Contaminated with Silver Nanoparticles

N. I. Tsepina^a, S. I. Kolesnikov^a, T. V. Minnikova^{a,#}, A. S. Ruseva^a

^a *Southern Federal University, Academy of Biology and Biotechnology,
prosp. Stachki 194/1, Rostov-on-Don 344090, Russia*

[#] *E-mail: loko261008@yandex.ru*

The dynamics of phytotoxicity indicators (germination and length of radish roots) of ordinary chernozem when contaminated with silver nanoparticles was studied. In laboratory conditions, ordinary chernozem was contaminated with silver nanoparticles (1, 10 and 100 mg/kg) for 3, 10, 30, 90 and 180 days. It was found that the more silver nanoparticles were introduced into the soil, the greater the decrease in germination and length of radish roots. There was no restoration of germination and length of radish roots with an increase in the period from the moment of contamination. In this study, the maximum toxic period from the moment of contamination for each indicator was identified by its sensitivity to silver nanoparticles and informativeness. The maximum toxicity of silver nanoparticles in relation to the root length and germination of radishes was noted on the 10th and 30th days, respectively. The results can be used to assess the phytotoxicity of soils contaminated with silver nanoparticles.

Keywords: soils, pollution, silver nanoparticles, biotesting, germination, root length, radish.