

Оригинальная статья / Original article  
УДК 631.453  
DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-61-75

## Биодиагностика устойчивости почв юга России к загрязнению серебром

Сергей И. Колесников, Наталья И. Цепина, Татьяна В. Минникова,  
Людмила В. Судьина, Камиль Ш. Казеев

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

### Контактное лицо

Наталья И. Цепина, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник НОЦ «Экология и природопользование», Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет; 344090 Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1.  
Тел. +79061828021  
Email [cepinanatalia@yandex.ru](mailto:cepinanatalia@yandex.ru)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0483-9829>

### Формат цитирования

Колесников С.И., Цепина Н.И., Минникова Т.В., Судьина Л.В., Казеев К.Ш. Биодиагностика устойчивости почв юга России к загрязнению серебром // Юг России: экология, развитие. 2021. Т.16, N 1. С. 61-75. DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-61-75

Получена 3 марта 2020 г.  
Прошла рецензирование 5 августа 2020 г.  
Принята 21 сентября 2020 г.

### Резюме

**Цель.** Дать оценку устойчивости почв юга России к загрязнению серебром по биологическим показателям.

**Методы.** Загрязнение почв юга России (чернозем обыкновенный, серопески и бурая лесная почва) серебром моделировали в лабораторных условиях. Почвы загрязняли водорастворимым нитратом серебра с целью выявления максимальной экотоксичности серебра. Устойчивость почв оценивали по наиболее чувствительным и информативным биологическим показателям в динамике через 10, 30 и 90 суток после загрязнения.

**Результаты.** Загрязнение серебром ингибирует активность оксидоредуктаз (каталазы и дегидрогеназ), снижает общую численность бактерий, рост и развитие редиса. Для всех почв отмечена прямая зависимость между концентрацией серебра и степенью ухудшения свойств почв. Токсическое действие серебра наиболее сильно проявилось на 30-е сутки после загрязнения. По устойчивости к загрязнению серебром исследованные почвы образуют следующий ряд: чернозем обыкновенный > серопески ≥ бурая лесная почва.

**Заключение.** Легкий гранулометрический состав серопесков и кислая реакция среды бурых лесных почв, а также низкое содержание органического вещества, способствуют высокой подвижности и высокой экотоксичности серебра в этих почвах. Разработаны региональные предельно допустимые концентрации (рПДК) содержания серебра в черноземах обыкновенных, серопесках и бурых лесных почвах – 4,4, 0,9 и 0,8 мг/кг соответственно.

### Ключевые слова

Биодиагностика, серебро, загрязнение, чернозем обыкновенный, бурая лесная почва, серопески, почвенные бактерии, ферментативная активность, фитотоксичность.

# Biodiagnostics of stability of soils of southern Russia to silver pollution

Sergey I. Kolesnikov, Natalya I. Tsepina, Tatyana V. Minnikova,  
Lyudmila V. Sudina and Kamil Sh. Kazeev

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

## Principal contact

Natalia I. Tsepina, Candidate of Biological Sciences, junior researcher, Ecology and Nature Management Scientific-Educational Centre, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University; 194/1 Stachki Ave., Rostov-on-Don, Russia 344090.  
Tel. +79061828021  
Email [cepinanatalia@yandex.ru](mailto:cepinanatalia@yandex.ru)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0483-9829>

## How to cite this article

Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Minnikova T.V., Sudina L.V., Kazeev K.Sh. Biodiagnostics of stability of soils of southern Russia to silver pollution. *South of Russia: ecology, development*. 2021, vol. 16, no. 1, pp. 61-75. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2021-1-61-75

Received 3 March 2020

Revised 5 August 2020

Accepted 21 September 2020

## Abstract

**Aim.** To assess the resistance of soils in the south of Russia to silver pollution using biological indicators.

**Methods.** The contamination of soils in southern Russia (ordinary chernozem, grey sandy and brown forest soils) was simulated with silver under laboratory conditions. Soils were contaminated with water-soluble silver nitrate in order to reveal the maximum ecotoxicity of silver. Soil stability was assessed according to the most sensitive and informative biological parameters in dynamics of 10, 30 and 90 days after pollution.

**Results.** Silver contamination inhibits the activity of oxidoreductases (catalase and dehydrogenases), reduces the total number of bacteria and the growth and development of radish. For all soils, a direct relationship was noted between silver concentration and the degree of deterioration of soil properties. The toxic effect of silver was most pronounced on the 30th day after contamination. According to their resistance to silver pollution, the soils investigated form the following sequence: ordinary chernozem > grey sandy soil ≥ brown forest soil.

**Conclusion.** The light granulometric composition of grey sandy soils and the acidic reaction of the environment of brown forest soils, as well as the low organic matter content, contribute to the high mobility and high ecotoxicity of silver in these soils. Regional maximum permissible concentrations (MPCs) of silver content in ordinary chernozems, grey sandy and brown forest soils have been determined as - 4.4, 0.9 and 0.8 mg/kg, respectively.

## Key Words

Biodiagnostics, silver, pollution, ordinary chernozem, brown forest soil, grey sandy soil, soil bacteria, enzymatic activity, phytotoxicity.

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение почв тяжелыми металлами широко распространено в России. К тяжелым металлам относят широкий диапазон металлов и металлоидов с плотностью более  $5 \text{ г / см}^3$  (свинец, медь, никель, хром и др.) [1]. Если токсическое действие широкого ряда металлов и нефтепродуктов на состояние почв России изучено многими авторами, то воздействие серебра и его соединений на почвы изучено недостаточно [2-11]. Наибольшая степень техногенного загрязнения почв серебром представлена в промышленных зонах крупных городских агломераций. В таких зонах высокая плотность населения и основных источников загрязнения серебром: теплоэлектростанции с сжиганием угля, предприятия цветной и черной металлургии, цементные заводы, полигоны твердых бытовых отходов, производство фото- и электротехнических материалов, применение пестицидов, использование осадков сточных вод в качестве удобрений и др. [12-15]. Известно, что при сжигании угля в атмосферу поступает 50% от общей массы, содержащегося в нем серебра [16]. За полувековой период в Китае произведено путем сжигания угля около 3864 тонн серебра [17].

Содержание серебра и его токсичность по отношению к окружающей среде за последние полвека растет с экспоненциальной скоростью с тенденцией к увеличению [18-20]. В загрязненных почвах содержание серебра по различным источникам составляет до 8 мг/кг [21], 9 мг/кг [22], 23 мг/кг [23], 35,9 мг/кг [24], до 7000 мг/кг в почвах рудных месторождений [25].

Серебро вызывает ингибирование активности ферментов и снижение проницаемости биологических мембран, повреждение ДНК, нарушение метаболизма и вызывает смерть клеток [4; 26-31].

Ингибирование активности ферментов тяжелыми металлами обусловлено тем, что тяжелые металлы ингибируют ферментативную активность главным образом за счет конкуренции за активные центры фермента с субстратом, денатурирования белка фермента и образования одновалентной связи с комплексами фермент-субстрат [32]. Подобные механизмы регулирования связаны со структурой почв и реакцией почвенной среды [33; 34]. Среди ферментов наиболее чувствительным к антропогенному загрязнению считают оксидоредуктазы. Оксидоредуктазы (каталаза, дегидрогеназы, пероксидазы и полифенолоксидазы) функционально важны для разложения загрязняющих веществ, трансформации органического вещества и поддержания метаболизма микроорганизмов [35; 36]. Дегидрогеназы представляют собой разновидность внутриклеточных оксидоредуктаз и играют существенную роль на начальных стадиях окисления органического вещества почвы путем переноса электронов или водорода из субстратов в акцепторы. Каталазы почв при загрязнении почв нефтяными углеводородами и тяжелыми металлами снижаются [37]. Активность каталазы связана с метаболической активностью аэробных организмов и часто используется в качестве индикатора плодородия почвы, благодаря своей стабильности активность каталазы коррелирует с

содержанием органического углерода. Кроме того, определение активности окислительно-восстановительных ферментов является достаточно простым и недорогим в лабораторных условиях.

Влияние серебра на биологическое состояние почв юга России и установление допустимых концентраций элемента в почве приоритетная задача в экологии и биологии почв.

*Цель* исследования – дать оценку устойчивости почв юга России к загрязнению серебром по биологическим показателям.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали различные по географии почвы юга России, с разными физическими свойствами, определяющими устойчивость к загрязнению тяжелыми металлами: чернозем обыкновенный, серопески – чернозем обыкновенный супесчаный, бурая лесная кислая почва (табл. 1). Почвы различаются по своему гранулометрическому составу, показателю кислотности почв, содержанию органического вещества. В незагрязненной почве содержание серебра по данным разных авторов составляет от 0,01 до 1,0 мг/кг [22; 38; 39]. Почва была отобрана из верхнего слоя 0-10 см, поскольку серебро обычно накапливается в поверхностных слоях почвы.

Загрязнение почв серебром моделировали в лабораторных условиях. При загрязнении серебро в почву поступает в форме сульфатов и сульфидов, и также в форме наночастиц [40-42]. Многие авторы наиболее токсичным соединением считают нитрат серебра [43-45]. Нитрат серебра является хорошо растворимым в воде веществом. Это позволяет оценить максимальную токсичность серебра, а также добиться равномерного распределения серебра в почве.

Токсичность тяжелых металлов в почве начинает проявляться, начиная с 3-4 фоновых концентраций в почве [46]. Фоновое содержание серебра в черноземе обыкновенном составляет 0.303 мг/кг, бурой лесной почве – 0.282 мг/кг, серопесках – 0.215 мг/кг (содержание серебра в почвах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой). Соответственно, загрязнение почвы серебром проводили в расчете 3 фоновых концентраций элемента или 1 условно допустимой концентрации (УДК) [47] в почве равной 1 мг/кг. Серебро вносили в почву в количестве 3, 30 и 300 фоновых концентраций: 1, 10 и 100 мг/кг соответственно. Поскольку содержание серебра в загрязненных почвах часто достигает 35 мг/кг [24], а в почвах рудных месторождений до 7000 мг/кг [25], то исследуемые концентрации и даже большие концентрации серебра в почве уже встречаются. Кроме того, одна из задач исследования – дать прогноз возможных негативных последствий такого уровня загрязнения.

Серебро вносили в форме раствора нитрата серебра в пересчете на концентрацию элемента. При температуре 20-22°C в вегетационный сосуд с почвой, просеянной через сито с диаметром ячеек 3 мм, вносили раствор нитрата серебра и увлажняли до 60% от полевой влагоемкости. Инкубацию почв проводили в

течение 10, 30 и 90 суток. В первой части эксперимента оценивали изменение биологических показателей разных почв юга России (чернозема обыкновенного, серопесков, бурой лесной почвы) при краткосрочном

воздействии (10 суток) загрязнителя. Во второй части эксперимента изменение биологических показателей чернозема обыкновенного через 10, 30 и 90 суток после загрязнения серебром.

**Таблица 1.** Характеристика свойств почв  
**Table 1.** Characterisation of soil properties

Тип почв (по WRB, 2015) Soil type (according to WRB, 2015)	Место отбора проб Sampling point	Координаты Coordinates	Содержание гумуса, % Humus content, %	pH
<b>чернозем обыкновенный</b> ordinary chernozems – Haplic Chernozems Loamic	<b>Ботанический сад ЮФУ, г. Ростов-на-Дону</b> Botanical Garden of SFU, Rostov-on-Don	47°14'17.54"N, 39°38'33.22"E	3,7	7,8
<b>серопески</b> grey sandy soils – Haplic Arenosols Eutric	<b>Ростовская область, Усть-Донецкий р-н, ст. Верхнекундрюченская</b> Rostov region, Ust-Donetsk district, Verkhnekundryuchenskaya stanitsa	47°46.015'N, 40°51.700'E	2,3	6,8
<b>бурые лесные почвы</b> brown forest soils – Haplic Cambisols Eutric	<b>Республика Адыгея, Майкопский район, п. Никель</b> Republic of Adygea, Maykop district, Nickel settlement	44°10.649'N, 40°9.469'E	1,8	5,8

При биологической диагностике состояния почв после химического загрязнения целесообразно использовать биологические показатели [48]. Биологические свойства почв определяли с использованием общепринятых в экологии и почвоведении методов исследования в 3-бти кратной аналитической повторности оценивали общую численность почвенных бактерий методом люминесцентной микроскопии на микроскопе Carl Zeiss Axio Lab; обилие бактерий рода *Azotobacter* определяли методом комочков обрастания на микробиологической среде Эшби; активность каталазы ( $H_2O_2:H_2O_2$ -оксидоредуктаза, КФ 1.11.1.6.) определяли волюметрическим методом по методу А.Ш. Галстяна (1978) по объему разложенной перекиси водорода за 1 мин, в мл  $O_2$  в 1 г почвы за 1 минуту; активность дегидрогеназ (субстрат : НАД (Ф) – оксидоредуктазы, КФ 1.1.1) определяли по методу А.Ш. Галстяна (1978) по восстановлению солей тетразолия в формазазы в мг трифенилформаза в 1 г почвы за 24 часа; фитотоксичность почв оценивали по всхожести семян редиса (*Raphanus sativus* L.) сорт «16 дней», длине побегов и корней через 7 дней после посадки [49]. Выбор этих биологических показателей для оценки состояния почвы при загрязнении серебром позволяет дать наиболее информативную картину протекающих биологических процессов в почве, ее экологического состояния и оценить динамику состояние в результате восстановления функций почвы [47; 48; 50-52].

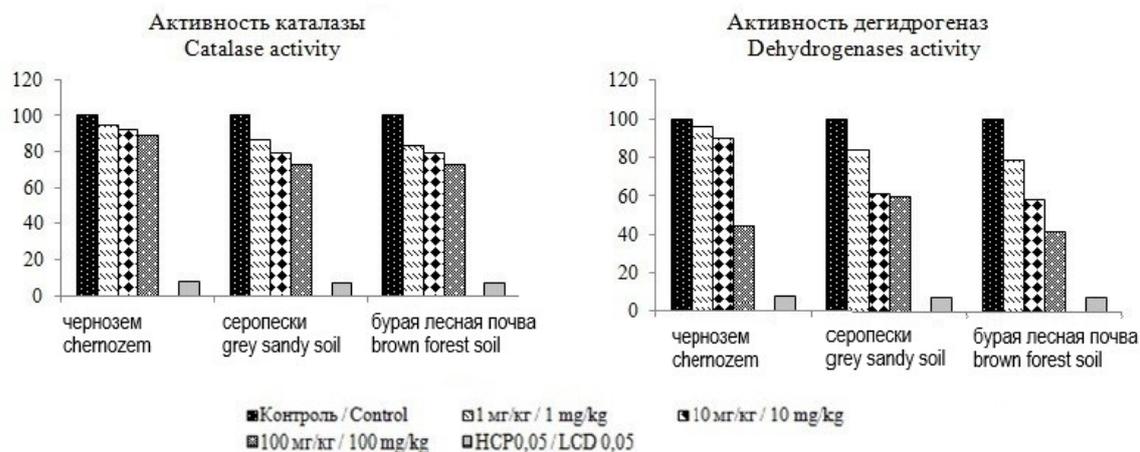
Для оценки состояния почвы по данным биологических показателей был использован результат расчета интегрального показателя биологического состояния (ИПБС) почвы [48]. Расчет ИПБС позволяет сравнить разные биологические показатели с отличными единицами измерения и позволяет сделать вывод о состоянии почв после загрязнения.

Для проверки полученных данных на достоверность был проведен дисперсионный анализ с последующим определением наименьшей существенной разности (НСР). Если разница между вариантами опыта больше НСР, то воздействие статистически достоверно.

#### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что загрязнение серебром в большинстве случаев ведет к ухудшению биологических свойств почв юга России (рис. 1-4, табл. 1-4). Степень снижения биологических свойств зависит от концентрации серебра в почве и срока от момента загрязнения. В большинстве вариантов отмечается прямая зависимость между концентрацией серебра и степенью ухудшения исследуемых свойств почв. По активности ферментов с ростом концентрации серебра в почве наибольшее снижение наблюдали по активности дегидрогеназ. Активность дегидрогеназ в серопесках и бурой лесной почве снижается уже при дозе 1 мг/кг на 16 и 21% соответственно.

Активность дегидрогеназ в серопесках и бурой лесной почве при увеличении концентрации серебра до 10 мг/кг снизилась на 39 и 42% соответственно. С ростом дозы до 100 мг/кг ингибирование активности дегидрогеназ отмечено для бурых лесных почв- 58% относительно контроля. При этом известны случаи, когда малые дозы серебра оказывали стимулирующее действие на активность уреазы и фосфатазы, длину корней редиса, пшеницы, фасоли и кукурузы, процесс нитрификации [53-56]. Активность дегидрогеназ чернозема обыкновенного снижалась только при дозе 100 мг/кг на 56%. Активность каталазы была меньше ингибирована, чем активность дегидрогеназ. Активность каталазы серопесков и бурой лесной почвы с ростом концентрации снижалась на 14-28%.



**Рисунок 1.** Изменение ферментативной активности почв юга России при загрязнении серебром через 10 суток, % от контроля

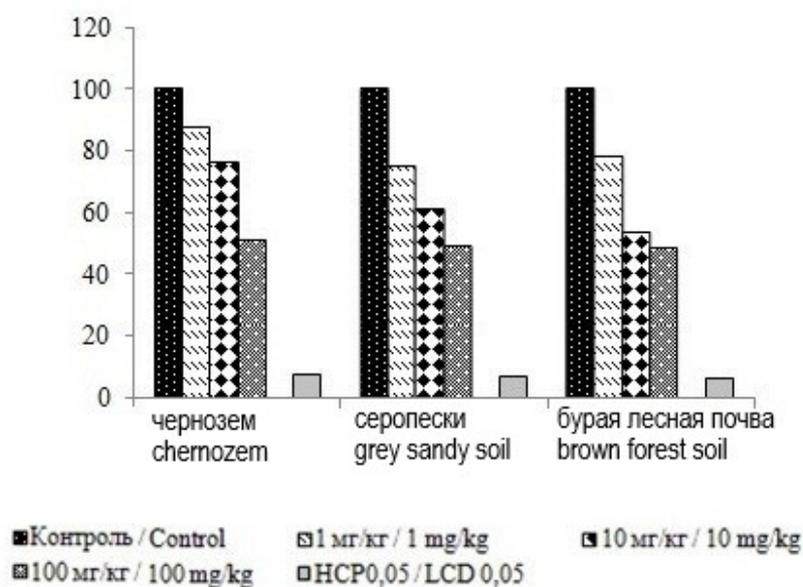
**Figure 1.** Change in enzymatic activity of soils in southern Russia following silver contamination after 10 days, % of control

Численность почвенных бактерий с ростом дозы снижалась во всех типах почв (рис. 2). При концентрации 1 мг/кг наибольшее ингибирование численности почвенных бактерий наблюдали в серопесках и бурой лесной почвах – 25 и 22% соответственно. При росте концентрации серебра до 10 мг/кг наблюдали снижение численности бактерий на 24, 39 и 47% относительно контроля для чернозема, серопесок и бурой лесной почвы.

При 10-ти кратном увеличении концентрации серебра в черноземе, серопесках и бурой лесной почве численность бактерий снизилась на 49, 51 и 52% соответственно.

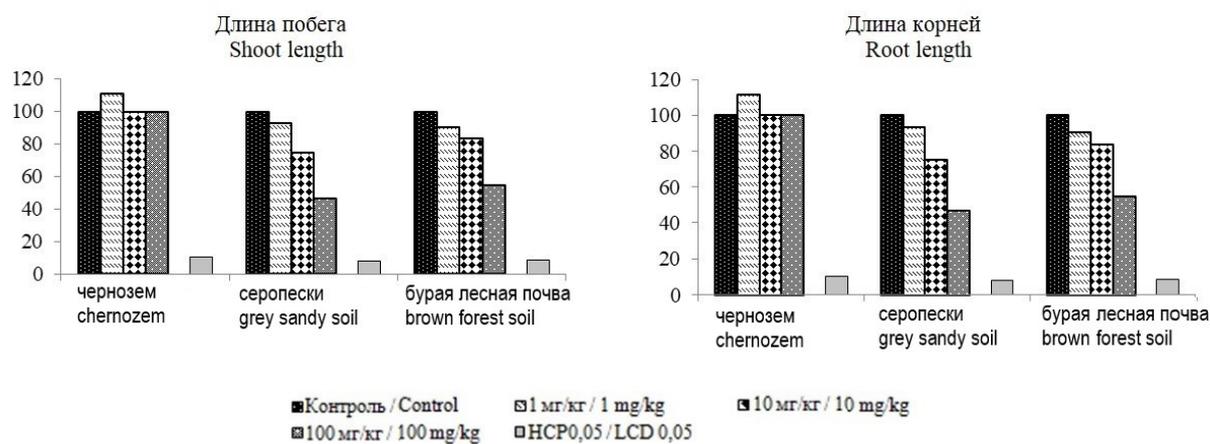
Изменение фитотоксических показателей почв после загрязнения серебром представлены на рисунке 3.

Длина побегов редиса снижалась на серопесках и бурой лесной почве при концентрации 10 мг/кг на 25 и 16% соответственно. При повышении концентрации до 100 мг/кг длина побегов редиса была ингибирована на 53 и 45% соответственно. Длина корней редиса, выращенного на серопесках и черноземе, также снижалась на 12 и 24% при концентрации 10 мг/кг, и на 24 и 29% при концентрации 100 мг/кг. Таким образом, при общем росте численности длина побегов и корней на серопесках и бурой лесной почве была сильно деформирована и на 15-50% меньше чем в контрольном варианте.



**Рисунок 2.** Изменение общей численности бактерий почв юга России при загрязнении серебром через 10 суток, % от контроля

**Figure 2.** Change in total number of soil bacteria in southern Russia following silver contamination after 10 days, % of control



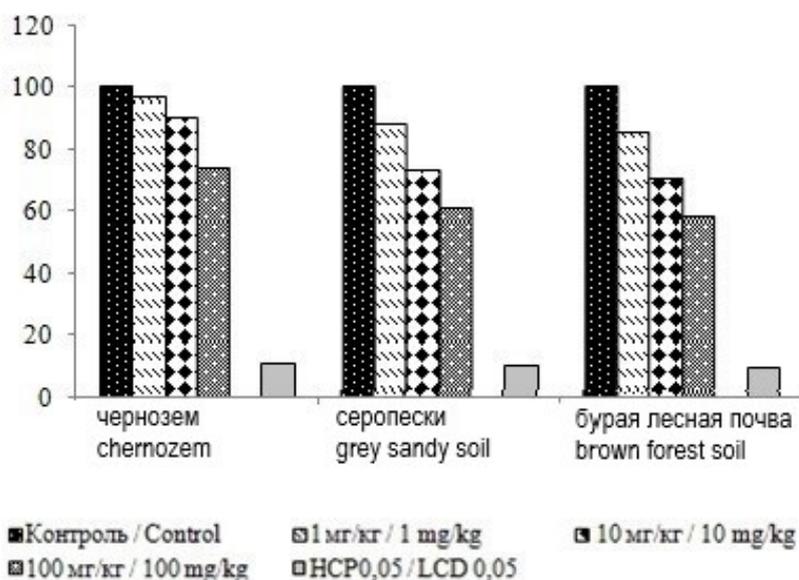
**Рисунок 3.** Изменение фитотоксических показателей почв юга России при загрязнении серебром через 10 суток, % от контроля

**Figure 3.** Change in phytotoxicity indicators of soils of southern Russia following contamination with silver after 10 days, % of control

Интегральный показатель биологического состояния почв был рассчитан по всем биологическим показателям каждого типа почв (рис. 4).

При сравнении устойчивости трех типов почв к загрязнению серебром был получен следующий ряд: чернозем обыкновенный > серопески > бурая лесная почва. Наибольшая чувствительность серопесков и

бурой лесной почвы обусловлена кислой реакцией среды ( $pH = 5,8$ ) и легким гранулометрическим составом, а также низкое содержание органического вещества (1,8 и 2,3% соответственно), что способствует высокой подвижности и, как следствие, высокой экотоксичности серебра в этих почвах.



**Рисунок 4.** Изменение интегрального показателя биологического состояния (ИПБС) почв юга России при загрязнении серебром через 10 суток

**Figure 4.** Change in the integral indicator of the biological state (IIBS) of soils in southern Russia following contamination with silver after 10 days

При оценке динамики биологического состояния чернозема было отмечено, что для большинства биологических показателей сильное ингибирование отмечено на 30-е сутки после загрязнения. На 90-е сутки наблюдалась тенденция к восстановлению биоло-

гических свойств чернозема, однако контрольные значения (до загрязнения почвы) достигнуты не были. Аналогичные закономерности в динамике биологических свойств почв после загрязнения были получены ранее для других тяжелых металлов: Hg, Cd,

Pb, Cr, Cu, Zn и др. [57; 58]. Было исследовано изменение биологических показателей чернозема при загрязнении различными концентрациями серебра в динамике: через 10, 30 и 90 суток (табл. 1-3).

Через 10 суток после загрязнения серебром наблюдали снижение численности почвенных бактерий

на 12, 44 и 49% при концентрации серебра 1, 10 и 100 мг/кг. Активность ферментов изменялась неодинаково при воздействии серебра: активность каталазы не изменялась, а активность дегидрогеназ была ингибирована при высокой концентрации 100 мг/кг на 56% (табл. 2).

**Таблица 2.** Изменение биологических показателей чернозема обыкновенного при загрязнении различными концентрациями серебра через 10 суток экспозиции

**Table 2.** Changes in the biological parameters of ordinary chernozem when contaminated with various silver doses after 10 days of exposure

Биологический показатель Biological indicator	Контроль Control	Концентрация серебра, мг/кг Dose of silver, mg/kg			НСР <sub>0,05</sub> LCD <sub>0,05</sub>
		1	10	100	
<b>Общая численность почвенных бактерий, млрд в 1 г почвы</b> Total number of bacteria 10 <sup>6</sup> per 1 g of soil	5,1	4,5	2,9	2,6	0,3
<b>Обилие бактерий р. Azotobacter, % комочков обрастания</b> Abundance of bacteria p. Azotobacter, % lumps of growth	91,0	88,0	84,0	69,0	12,5
<b>Активность каталазы, мл О<sub>2</sub> на 1 г почвы за 1 мин</b> Catalase activity, ml O <sub>2</sub> per 1 g of soil in 1 min	11,3	10,7	10,6	10,1	0,9
<b>Активность дегидрогеназ, мг ТФФ на 10 г почвы за 24 часа</b> Dehydrogenases activity, mg TPP per 10 g of soil in 24 hours	26,1	25,1	23,6	11,6	2,2
<b>Длина корней редиса, % от контроля</b> Length of radish roots, % of control	100,0	95,1	92,0	82,5	8,4
<b>ИПБС / IIBS</b>	100,0	96,8	87,4	73,7	9,0

Относительно фитотоксических показателей наблюдали ухудшение морфологических характеристик растения в виде уменьшения длины корней редиса на 17%. По биологическим показателям был рассчитан ИПБС, по итогам которого с ростом концентрации ИПБС снижался на 12-26%.

Через 30 суток после загрязнения серебром численность почвенных бактерий снижалась на 16-51%, активность дегидрогеназ на 46%, активность каталазы - 16%, снижение обилия бактерий р. Azotobacter на 23% (табл. 3).

**Таблица 3.** Изменение биологических показателей чернозема обыкновенного при загрязнении различными концентрациями серебра через 30 суток экспозиции

**Table 3.** Changes in the biological parameters of ordinary chernozem when contaminated with various silver doses after 30 days of exposure

Биологический показатель Biological indicator	Контроль Control	Концентрация серебра, мг/кг Dose of silver, mg/kg			НСР <sub>0,05</sub> LCD <sub>0,05</sub>
		1	10	100	
<b>Общая численность почвенных бактерий, млрд в 1 г почвы</b> Total number of bacteria 10 <sup>6</sup> per 1 g of soil	4,9	4,0	2,6	2,4	0,3
<b>Обилие бактерий р. Azotobacter, % комочков обрастания</b> Abundance of bacteria p. Azotobacter, % growth nodules	100,0	98,0	98,0	77,0	14,1
<b>Активность каталазы, мл О<sub>2</sub> на 1 г почвы за 1 мин</b> Catalase activity, ml O <sub>2</sub> per 1 g of soil in 1 min	11,7	11,0	10,7	9,9	0,9
<b>Активность дегидрогеназ, мг ТФФ на 10 г почвы за 24 часа /</b> Dehydrogenases activity, mg TPP per 10 g of soil in 24 hours	29,9	31,8	28,5	16,2	2,7
<b>Длина корней редиса, % от контроля</b> Length of radish roots, % of control	100,0	95,0	76,0	71,0	7,8
<b>ИПБС / IIBS</b>	100,0	95,2	83,7	65,3	8,7

ИПБС почв также снижался в зависимости от концентрации серебра на 16 и 34% при концентрации 10 и 100 мг/кг соответственно.

По истечении 90 суток тенденция к снижению активности дегидрогеназ и численности бактерий сохранилась (табл. 4). При концентрации серебра 100 мг/кг численность бактерий снизилась на 41%, активность дегидрогеназ – 22% по сравнению с контролем.

На основе полученных биологических показателей состояния почв при загрязнении серебром была дана оценка их информативности и чувствительности с целью определения эффективности использования в мониторинге, диагностике и нормировании загрязнения почв серебром. Для расчета чувствительности использовали степень снижения

значений биологического показателя по сравнению с контролем:

общая численность бактерий (66) > активность дегидрогеназ (84) > длина корней редиса (89) > активность каталазы (91) > обилие бактерий рода *Azotobacter* (92).

Для оценки информативности биологических показателей оценивали тесноту корреляции между показателем и концентрации серебра в почве. По степени информативности биологические показатели чернозема обыкновенного образуют следующую последовательность: активность дегидрогеназ (-0,99) ≥ обилие бактерий рода *Azotobacter* (-0,99) > длина корней редиса (-0,86) > активность каталазы (-0,76) > общая численность бактерий (-0,72).

**Таблица 4.** Изменение биологических показателей чернозема обыкновенного при загрязнении различными концентрациями серебра через 90 суток экспозиции

**Table 4.** Change in the biological parameters of ordinary chernozem when contaminated with various silver doses after 90 days of exposure

Биологический показатель Biological indicator	Контроль Control	Концентрация серебра, мг/кг Dose of silver, mg/kg			НСР <sub>0,05</sub> LCD <sub>0,05</sub>
		1	10	100	
<b>Общая численность почвенных бактерий, млрд в 1 г почвы</b> Total number of bacteria 10 <sup>6</sup> per 1 g of soil	4,7	4,3	3,2	2,8	0,3
<b>Обилие бактерий р. <i>Azotobacter</i>, % комочков обрастания</b> Abundance of bacteria p. <i>Azotobacter</i> , % growth nodules	100,0	100,0	100,0	88,0	14,6
<b>Активность каталазы, мл O<sub>2</sub> на 1 г почвы за 1 мин /</b> Catalase activity, ml O <sub>2</sub> per 1 g of soil in 1 min	10,3	9,6	9,3	9,2	0,8
<b>Активность дегидрогеназ, мг ТФФ на 10 г почвы за 24 часа</b> Dehydrogenases activity, mg TPP per 10 g of soil in 24 hours	18,2	17,8	17,1	14,2	1,7
<b>Длина корней редиса, % от контроля</b> Length of radish roots, % of control	100,0	99,0	97,8	96,3	8,9
<b>ИПБС / ИБС</b>	100,0	98,0	87,8	80,5	9,2

Как было уже доказано ранее при загрязнении почв тяжелыми металлами происходит нарушение биогеоценологических функций почвы [58]. Нарушение этих функций напрямую связано с концентрацией металла в почве. Сначала происходит нарушение информационных, биохимических, физико-химических, химических, целостных и физических функций. Именно для целостной оценки степени нарушения экосистемных функций используют интегральный показатель биологического состояния почв (ИПБС). При снижении ИПБС менее чем на 5% нарушения экосистемных функций почвы не происходит, однако снижение значений ИПБС на 5-10% уже служит индикатором нарушения информационных функций, при снижении ИПБС на 10-25% – биохимических, физико-химических, химических и целостных, а при снижении более чем на 25% – физических функций [46]. Важнейшей задачей экологического нормирования должен быть контроль за основными экосистемными

функциями почвы и недопущение их нарушения. Таким образом, снижение ИПБС более чем на 10%, указывает на серьезные нарушения в функционировании почвы. Доза загрязняющего почву вещества, вызывающая снижение ИПБС почвы на 10%, может считаться региональной предельно-допустимой концентрацией (рПДК) этого вещества в данной почве, превышение которой недопустимо. Для расчета рПДК применяют уравнения регрессии, которое описывает зависимость снижения значений ИПБС от содержания серебра в почве. С помощью уравнения регрессии можно рассчитать концентрацию серебра, которые вызывают нарушение тех или иных групп экосистемных функций почвы.

При загрязнении почв юга России серебром наблюдали похожие тенденции. Как видно из табл. 5, если в черноземе обыкновенном содержание серебра не превышает 0,5 мг/кг, то срыв экологических функций почвы не происходит.

**Таблица 5.** Схема экологического нормирования загрязнения серебром почв юга России по степени нарушения экосистемных (биогеоценологических) функций**Table 5.** Scheme of environmental regulation of silver pollution in soils of southern Russia by degree of violation of ecosystem (biogeocenotic) functions

Степень нарушения экологических функций Degree of violation of environmental functions	Степень снижения ИПБС почвы <sup>1</sup> , % Power decrease IIBS soil <sup>1</sup> , %	Нарушаемые экосистемные функции <sup>2</sup> Violated ecosystem functions <sup>2</sup>	Почвы / Soils			Способы санации почв Soil remediation methods
			Чернозем обыкновенный Ordinary chernozem	Серопески Grey sandy soils	Бурые лесные почвы Brown forest soils	
Не загрязненные Not polluted	< 5	–	< 0,5	< 0,3	< 0,3	Не требуется Not required
Слабо-загрязненные Weakly polluted	5 – 10	Информационные Informational	1,5 – 4,4	0,5 – 0,9	0,4 – 0,8	Фиторемедиация Phytoremediation
Средне-загрязненные Medium polluted	10 – 25	Химические, физико-химические, биохимические; целостные Chemical, physico-chemical, biochemical; holistic	4,4 – 106	0,9 – 8	0,8 – 6	Химическая мелиорация Chemical reclamation
Сильно-загрязненные Strongly polluted	> 25	Физически Physical	> 106	> 8	> 6	Техническая рекультивация Technical Remediation

Примечание: <sup>1</sup>Определение ИПБС почв по Kolesnikov et al. (2019) [47];

<sup>2</sup>Классификация экосистемных функций почвы по Добровольскому и Никитину(2006) [59]

Note: <sup>1</sup>IIBS determination of soils by Kolesnikov et al., 2019 [47];

<sup>2</sup>Classification of ecosystem functions of soil by Dobrovolsky and Nikitin, 2006 [59]

Однако, если концентрация серебра составит от 1,5-4,4 мг/кг, произойдет нарушение информационных экологических функций почвы, от 4,4-106,0 мг/кг – вместе с информационными наблюдали нарушение химических, физико-химических, биохимических и целостных функций, а при нарушении более 106,0 мг/кг – произойдет нарушение физических функций почвы. Является очевидным, что нельзя допускать нарушение химических, физико-химических, биохимических и целостных функций почвы. Целостные функции обеспечивают плодородие почвы. Концентрацию серебра 4,4 мг/кг следует считать предельно допустимой концентрацией (ПДК) серебра в черноземе обыкновенном, или региональной ПДК (рПДК). Таким образом, рПДК серебра в черноземах обыкновенных составляет 4,4 мг/кг серебра в почве, в серопесках – 0,9 мг/кг, и бурых лесных – 0,8 мг/кг. Разработанные рПДК могут быть использованы не только для почв юга России но и для аналогичных почв других регионов мира.

Наиболее эффективные способы санации почв юга России в случае их загрязнения серебром в определенной концентрации представлены в табл. 6. Чем выше концентрация серебра в почве, тем более действенным и эффективным должен быть способ санации. При концентрации серебра в черноземе обыкновенном менее 0,5 мг/кг не происходит нарушение экологических функций, и санация почвы не требуется. Если концентрация серебра составит 1,5-4,4 мг/кг, то для снижения его концентрации до 0,5 мг/кг и менее достаточно фиторемедиации и промывки. При

достижении концентрации серебра в диапазоне 4,4-106 мг/кг уже требуется внесение органических и минеральных удобрений (фосфорных удобрений, извести и др.), адсорбентов (ионообменных смол, цеолитов и др.) в рамках химической рекультивации. Если содержание серебра превысит 106 мг/кг, то необходимо удаление загрязненного слоя почвы и замена его новым экологически и сельскохозяйственно полноценным слоем почвы.

Полученные результаты являются частью диссертационного исследования Н.И. Цепиной «Влияние загрязнения серебром на биологические свойства почв Юга России» [60].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение почв серебром в большинстве случаев ведет к ухудшению их биологических свойств: снижаются общая численность бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*, активность ферментов (каталазы и дегидрогеназ), показатели фитотоксичности. Степень снижения биологических свойств зависит от концентрации серебра в почве и срока от момента загрязнения. В большинстве вариантов отмечается прямая зависимость между концентрацией серебра и степенью ухудшения исследуемых свойств почв. Токсическое действие серебра наиболее сильно проявилось на 30-е сутки после загрязнения. При сравнении устойчивости почв юга России к загрязнению серебром был получен следующий ряд: чернозем обыкновенный > серопески ≥ бурая лесная почва. Легкий гранулометрический состав

серопесков и кислая реакция среды бурых лесных почв, а также низкое содержание органического вещества, способствуют высокой подвижности и высокой экотоксичности серебра в этих почвах. Определенные в данной работе биологические показатели обладают высоким коэффициентом корреляции с загрязнением почвы серебром и высокой чувствительностью к загрязнению почвы серебром. Эти биологические показатели целесообразно использовать в целях мониторинга, диагностики, индикации и нормирования загрязнения почв серебром. В результате исследования предложены региональные предельно допустимые концентрации (рПДК) серебра в черноземах обыкновенных (Haplic Chernozems Loamic) – 4,4 мг/кг, в серопесках (Haplic Arenosols Eutric) – 0,9 мг/кг и бурых лесных почвах (Haplic Cambisols Eutric) – 0,8 мг/кг.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Южный федеральный университет, № 0852-2020-0029) и ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-2511.2020.11).

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Southern Federal University, no. 0852-2020-0029) and leading scientific school of the Russian Federation (NSH-2511.2020.11).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Oves M., Khan M.S., Zaidi A., Ahmad E. Soil contamination, nutritive value, and human health risk assessment of heavy metals: an overview. In: Zaidi A., Wani P., Khan M. (eds) Toxicity of Heavy Metals to Legumes and Bioremediation. Springer, Vienna. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0730-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0730-0_1)
- Ветрова А.А., Забелин В.А., Иванова А.А., Адаменко Л.А., Делеган Я.А., Петриков К.В. Биодegradация нефти консорциумом штаммов-нефтедеструкторов в лабораторных модельных системах // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. N 1. С. 184-198. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-184-198
- Водяницкий Ю.Н. Оценка суммарной токсикологической загрязненности почв тяжелыми металлами и металлоидами // Агрохимия. 2017. N 2. С. 56-63.
- Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А. Биогеохимические барьеры для ремедиации почв и очистки почвенно-грунтовых вод // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2016. N 3. С. 3-15.
- Водяницкий Ю.Н., Яковлев А.С. Загрязнение почв и почвенно-грунтовых вод новыми органическими микрополлютантами (обзор) // Почвоведение. 2016. N 5. С. 609-619. DOI: 10.7868/S0032180X16050154
- Дауд Р.М., Колесников С.И., Кузина А.А., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Разработка региональных предельно допустимых концентраций нефти в почвах аридных экосистем юга России // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. N 9. С. 66-70. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-09-66-70
- Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Мясникова М.А. Оценка экотоксичности наночастиц меди, никеля и цинка по биологическим показателям чернозема // Почвоведение. 2019. N 8. С. 986-992. DOI: 10.1134/S0032180X19080094
- Сукиасян А.Р. Новый подход определения фактора экологического риска по биогеохимическим коэффициентам тяжелых металлов // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. N 4. С. 108-118. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-4-108-118
- Минникова Т.В., Колесников С.И., Денисова Т.В. Влияние азотных и гуминовых удобрений на биохимическое состояние нефтезагрязненного чернозема // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14. N 2. С. 189-201. DOI: 10.18470/1992-1098-2019-2-189-201
- Kolesnikov S.I., Varduny T.V., Lysenko V.S., Kapralova O.A., Chokheli V.A., Sereda M.M., Dmitriev P.A., Varduny V.M. Effect of nano and crystalline metal oxides on growth, gene and cytotoxicity of plants *in vitro* and *ex vitro* // Turczaninowia. 2018. V. 21. N 4. P. 207-214. DOI: 10.14258/turczaninowia.21.4.21
- Minnikova T.V., Denisova T.V., Mandzhieva S.S., Kolesnikov S.I., Minkina T.M., Chaplygin V.A., Burachevskaya M.V., Sushkova S.N., Bauer T.V. Assessing the effect of heavy metals from the Novochechensk power station emissions on the biological activity of soils in the adjacent areas // Journal of Geochemical Exploration. 2017. V. 174. P. 70-78. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.06.007
- Крылов Д.А. Негативное воздействие микроэлементов, содержащихся в углях, в золошлаковых отвалах и в золе-уносе угольных ТЭС, на окружающую среду и здоровье людей. Препринт НИЦ «Курчатовского института». М., 2012. 37 с.
- Пашкевич М.А., Алексеенко А.В. Мониторинг загрязнения почв в районе воздействия ОАО «Новоросцемент» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. N 10. С. 369-375.
- Щербакова Е.В. Экологическое состояние почв и техногенных грунтов свалки города Славянска-на-Кубани // Экологические проблемы промышленных городов: сб. науч. тр. Саратов, 2013. С. 106-107.
- Michels C., Perazzoli S., Soares H.M. Inhibition of the enriched culture of ammonium-oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite // Common environment science. 2017. V. 586. P. 995-1002. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.080
- Кизильштейн Л.Я., Левченко С.В. Элементы примеси и экологические проблемы угольной энергетики // Теплоэнергетика. 2003. С. 14-19.
- Xing G., Zhu J., Xiong Z. Ag, Ta, Ru, and Ir enrichment in surface soil: Evidence for land pollution of heavy metal from atmospheric deposition // Global Biogeochemical Cycles. 2004. V. 18. Iss. 1. P. 1-5. DOI: 10.1029/2003GB002123
- Касимов Н.С., Власов Д.В. Технофильность химических элементов в начале XXI века // Вестник Московского Университета. Сер. 5. География. 2012. N 1. С. 15-22.
- Aueviriyavit S., Phummiratch D., Maniratanachote R. Mechanistic study on the biological effects of silver and gold nanoparticles in CaCO<sup>-2</sup> cells – induction of the Nrf2/HO<sup>-1</sup> pathway by high concentrations of silver

- nanoparticles // *Toxicology Letters*. 2014. V. 224. Iss. 1. P. 73-83. DOI: 10.1016/j.toxlet.2013.09.020
20. Benn T., Cavanagh B., Histovski K., Posner J.D., Westerhoff P. The release of nanosilver from consumer products used in the home // *Journal of Environmental Quality*. 2010. V. 39. Iss. 6. P. 1875-1882. DOI: 10.2134/jeq2009.0363
21. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Presspp. 2010. 548 p.
22. Jones K.C., Davies B.E., Peterson P.J. Silver in Welsh soils: Physical and chemical distribution studies // *Geoderma*. 1986. V. 37. Iss. 2. P. 157-174. DOI: 10.1016/0016-7061(86)90028-5
23. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Алексеев И.А., Салтыков А.В. Особенности накопления и распределения тяжелых металлов и мышьяка в системе огородные почвы-овощные культуры в районе строительства космодрома «Восточный» (Бассейн р. Зeya, Амурская область) // *Агрохимия*. 2015. N 2. С. 86-96.
24. Yildirim D., Sasmaz A. Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey) // *Journal of Geochemical Exploration*. 2017. V. 182. Part B. P. 228-234. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.11.005
25. Дружинин А.В., Карелина Е.В. Основные типы промышленных месторождений серебра // *Вестник РУДН: Серия инженерные исследования*. 2008. N 1. С. 35-41.
26. Gomathi M., Rajkumar P.V., Prakasam A., Ravichandran K. Green synthesis of silver nanoparticles using *Datura stramonium* leaf extract and assessment of their antibacterial activity // *Resource-Efficient Technologies*. 2017. V. 3. Iss. 3. P. 280-284. DOI: 10.1016/j.reffit.2016.12.005
27. Liu W., Zeng Z., Chen A., Zeng G., Xiao R., Guo Zh., Yi F., Huang Zh., He K., Hu L. Toxicity effects of silver nanoparticles on the freshwater bivalve *Corbicula fluminea* // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. V. 6. Iss. 4. P. 4236-4244. DOI: 10.1016/j.jece.2018.06.032
28. Reidy B., Haase A., Luch A., Dawson K.A., Lynch I. Mechanisms for the isolation, transformation and toxicity of silver nanoparticles: a critical review of current knowledge and recommendations for future research and applications // *Materials (Basel)*. 2013. V. 6. Iss. 6. P. 2295-2350. DOI: 10.3390/ma6062295
29. Sayeda A.E.H., Solimanb H.A.M. Developmental toxicity and DNA damaging properties of silver nanoparticles in the catfish (*Clarias gariepinus*) // *Mutation Research Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2017. V. 822. P. 34-40. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2017.07.002
30. Sharma V.K., Siskova K.M., Zboril R., Gardea-Torresdey J.L. Organic-coated silver nanoparticles in biological and environmental conditions: Fate, stability and toxicity // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2014. V. 204. P. 15-34. DOI: 10.1016/j.cis.2013.12.002
31. Sun C., Yin N., Wen R., Liu W., Jia Y., Hua L., Zhou Q., Jiang G. Silver nanoparticles induced neurotoxicity through oxidative stress in rat cerebral astrocytes is distinct from the effects of silver ions // *NeuroToxicology*. 2016. V. 52. P. 210-221. DOI: 10.1016/j.neuro.2015.09.007
32. Vig K., Megharaj M., Sethunathan N., Naidu R. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review // *Advances Environmental Research*. 2003. V. 8. Iss. 1. P. 121-135. DOI: 10.1016/S1093-0191(02)00135-1
33. Benini S., Cianci M., Mazzei L., Ciurli S. Fluoride inhibition of *Sporosarcina pasteurii* urease: structure and thermodynamics // *Journal Biological Inorganic Chemistry*. 2014. N 19. P. 1243-1261. DOI: 10.1007/s00775-014-1182-x
34. Kaya E.D., Söyüt H., Beydemir S. The toxicological impacts of some heavy metals on carbonic anhydrase from gilthead sea bream (*Sparus aurata*) gills // *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2015. V. 39. Iss. 2. P. 825-832. DOI: 10.1016/j.etap.2015.01.021
35. Liu Y., Zeng G., Zhong H., Wang Z., Liu Z., Cheng M., Liu G., Yang X., Liu S. Effect of rhamnolipid solubilization on hexadecane bioavailability: enhancement or reduction? // *Journal Hazardous Materials*. 2017. V 322. Part B. P. 394-401. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.10.025
36. Kaczynski P., Lozowicka B., Hrynkо I., Wolejko E. Behaviour of mesotrione in maize and soil system and its influence on soil dehydrogenase activity // *Science Total Environmental*. 2016. V. 571. P. 1079-1088. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.100
37. Stepniewska Z., Wolińska A., Ziomek J. Response of soil catalase activity to chromium contamination // *Journal of Environmental Sciences*. 2009. V 21. Iss. 8. P. 1142-1147. DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62394-3
38. Bowen H.J.M. *Environmental Chemistry of the Elements*, New York, Academic Press, 1979. 333 p.
39. Алексеенко В.А., Алексеенко А.В. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв седиментных ландшафтов. Ростов н/Д: Издательство Южного федерального университета, 2013. 380 с.
40. Eivazi F., Afrasiabi Z., Jose E. Effects of Silver Nanoparticles on the Activities of Soil Enzymes Involved in Carbon and Nutrient Cycling // *Pedosphere*. 2018. V. 28. Iss. 2. P. 209-214. DOI: 10.1016/S1002-0160(18)60019-0
41. Girilal M., Krishnakumar V., Poornima P., Fayazd M.A., Kalaichelvan P.T.A comparative study on biologically and chemically synthesized silver nanoparticles induced Heat Shock Proteins on fresh water fish *Oreochromis niloticus* // *Chemosphere*. 2015. V. 139. P. 461-468. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.08.005
42. Smith I., Carson B. Trace metals in the environment. Vol. 2. Silver. Ann Arbor, MI, Ann Arbor Science Publishers, 1977, 469 p.
43. Cvjetko 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 // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017. V. 137. P. 8-28. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.11.009
44. Tripathi A., Liu S., Kumar S.P., Kumar N., Chandra P.A., Tripathi D.K., Chauhan K. D., Sahi Sh. Differential phytotoxic responses of silver nitrate (AgNO<sub>3</sub>) and silver nanoparticle (AgNps) in *Cucumis sativus* L. // *Plant genetic resources*. 2017. V. 11. Part B. P. 255-264. DOI: 10.1016/j.plgene.2017.07.005
45. Yasur J., Rani P.U. Environmental effects of nanosilver: impact on castor seed germination, seedling growth, and plant physiology // *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. V. 20. Iss. 12. P. 8636-8648. DOI: 10.1007/s11356-013-1798-3
46. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Yu.V. Development of regional standards for pollutants in the soil

using biological parameters // Environmental Monitoring and Assessment. 2019. N 191. P. 544. DOI: 10.1007/s10661-019-7718-3

47. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. Ranking of chemical elements according to their ecological hazard for soil // Russian Agricultural Sciences. 2010. V. 36. N 1. P. 32-34. DOI: 10.3103/S1068367410010106

48. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Val'kov V.F. Effects of heavy metal pollution on the ecological and biological characteristics of common chernozem // Russian Journal of Ecology. 2000. V. 31. N 3. P. 174-181. DOI: 10.1007/BF02762817

49. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2016. 356 с.

50. Минникова Т.В., Сушкова С.Н., Манджиева С.С., Минкина Т.М., Колесников С.И. Оценка влияния бенз(а)пирена на биологическую активность чернозема Ростовской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. N 12. С. 91-102. DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2396

51. Chen J., He F., Zhang X., Sun X., Zheng J., Zheng J. Heavy metal pollution decreases microbial abundance, diversity and activity within particle-size fractions of a paddy soil // FEMS Microbiology Ecology. 2014. V. 87. Iss. 1. P. 164-181. DOI: 10.1111/1574-6941.12212

52. Yang J.S., Yang F.L., Yang Y., Xing G.L., Deng C.P., Shen Y.T., Luo L.Q., Li B.Z., Yuan, H.L. A proposal of "core enzyme" bioindicator in long-term Pb-Zn ore pollution areas based on topsoil property analysis // Environmental Pollution. 2016. V. 213. P. 760-769. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.03.030

53. Iram F., Iqbal M.S., Athar M.M., Saeed M.Z., Yasmeen A., Ahmad R. Glucosylan-mediated green synthesis of gold and silver nanoparticles and their phyto-toxicity study // Carbohydrate Polymers. 2014. V. 104. N 1. P. 29-33. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.01.002

54. Langdon K.A., McLaughlin M.J., Kirby J.K., Merrington G. The effect of soil properties on the toxicity of silver to the soil nitrification process // Environmental and Toxicology Chemistry. 2014. V. 33. Iss. 5. P. 1170-1178. DOI: 10.1002/etc.2543

55. Rahmatpour S., Shirvani M., Mosaddeghi M.R., Farshid N., Bazarganipour M. Dose-response effects of silver nanoparticles and silver nitrate on microbial and enzyme activities in calcareous soils // Geoderma. 2017. V. 285. P. 313-322. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.10.006

56. Salama H.M.H. Effects of silver nanoparticles in some crop plants, Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.) // Journal Biotechnology. 2012. V. 3. N 10. P. 190-197. URL: <http://www.interestjournals.org/IRJOB> (дата обращения: 10.09.2019)

57. Kolesnikov S.I., Evreinova A.V., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Changes in the Ecological and Biological Properties of Ordinary Chernozems Polluted by Heavy Metals of the Second Hazard Class (Mo, Co, Cr, and Ni) // Eurasian Soil Science. 2009. V. 42. N 8. P. 936-942. DOI: 10.1134/S1064229309080122

58. Kolesnikov S.I., Popovich A.A., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. The Influence of Fluorine, Boron, Selenium, and Arsenic

Pollution on the Biological Properties of Ordinary Chernozems // Eurasian Soil Science. 2008. V. 41. N 4. P. 400-404. DOI: 10.1134/S1064229308040066

59. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Наука, 2006. 362 с.

60. Цепина Н.И. Влияние загрязнения серебром на биологические свойства почв Юга России: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук: специальность 03.02.08. Ростов-на-Дону, 2020. 21 с.

#### REFERENCES

- Oves M., Khan M.S., Zaidi A., Ahmad E. Soil contamination, nutritive value, and human health risk assessment of heavy metals: an overview. In: Zaidi A., Wani P., Khan M. (eds) *Toxicity of Heavy Metals to Legumes and Bioremediation*, Springer, Vienna. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0730-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0730-0_1)
- Vetrova A.A., Zabelin V.A., Ivanova A.A., Adamenko L.A., Delegan Ya.A., Petrikov K.V. Oil biodegradation by consortium of oil degrading microorganisms in laboratory model systems. *South of Russia: ecology, development*, 2018, vol. 13, no. 1, pp. 184-198. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-184-198
- Vodyanitskii Yu.N. The evaluation of total toxicological contamination of soils with heavy metals and metalloids. *Agrokhimiya [Agrochemistry]*. 2017, no. 2, pp. 56-63. (In Russian)
- Vodyanitskii Yu.N., Shoba S.A. Biogeochemical barriers for soil and groundwater bioremediation. [Moscow University Herald. Series 17: Soil Science]. 2016, no. 3, pp. 3-15. (In Russian)
- Vodyanitskii Y.N., Yakovlev A.S. Contamination of soils and groundwater with new organic micropollutants: a review. *Soil Science*, 2016, no. 5, pp. 609-619. (In Russian) DOI: 10.7868/S0032180X16050154
- Daoud R.M., Kolesnikov S.I., Kuzina A.A., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Development of regional maximum permissible concentrations of oil in the soils of arid ecosystems in the south of Russia. *Ecology and Industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 9, pp. 66-70. (In Russian) DOI: 10.18412/1816-0395-2019-09-66-70
- Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V., Myasnikova M.A. Ecotoxicity of copper, nickel, and zinc nanoparticles assessment on the basis of biological indicators of chernozems. *Soil Science*, 2019, no. 8, pp. 986-992. (In Russian) DOI: 10.1134/S0032180X19080094
- Sukiasyan A.R. New approach to determining the environmental risk factor by the biogeochemical coefficients of heavy metals. *South of Russia: ecology, development*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 108-118. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2018-4-108-118
- Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Denisova T.V. Effect of nitrogen and humic fertilizers on the biochemical state of oil-contaminated chernozem. *South of Russia: ecology, development*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 189-201. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2019-2-189-201
- Kolesnikov S.I., Varduny T.V., Lysenko V.S., Kapralova O.A., Chokheli V.A., Sereda M.M., Dmitriev P.A., Varduny V.M. Effect of nano and crystalline metal oxides on growth, gene and cytotoxicity of plants *in vitro* and *ex vitro*.

- Turczaninowia*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 207-214. DOI: 10.14258/turczaninowia.21.4.21
11. Minnikova T.V., Denisova T.V., Mandzhieva S.S., Kolesnikov S.I., Minkina T.M., Chaplygin V.A., Burachevskaya M.V., Sushkova S.N., Bauer T.V. Assessing the effect of heavy metals from the Novocherkassk power station emissions on the biological activity of soils in the adjacent areas. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 174, pp. 70-78. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.06.007
12. Krylov D.A. *Negativnoe vozdeistvie mikroelementov, sodershashchikhsya v uglyakh, v zoloshlakovykh otvalakh i v zlorov'e lyudei* [The negative impact of trace elements contained in coal, in ash and slag dumps and in fly ash of coal TPPs, on the environment and human health]. Moscow, 2012, 37 p. (In Russian)
13. Pashkevich M.A., Alekseenko A.V. Monitoring of soil pollution in the area of JSC "Novoroscement" impact. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2015, no. 10, pp. 369-375. (In Russian)
14. Shcherbakova E.V. Ekologicheskoe sostoyanie pochv i tekhnogennykh gruntov svalki goroda Slavyanska-na-Kubani [Ecological condition of soils and industrial soils in the landfill of the city of Slavyansk-on-Kuban]. In: *Ekologicheskie problemy promyshlennykh gorodov* [Environmental problems of industrial cities]. Saratov, 2013, pp. 106-107. (In Russian)
15. Michels C., Perazzoli S., Soares H.M. Inhibition of the enriched culture of ammonium-oxidizing bacteria by two different nanoparticles: silver and magnetite. *Common environment science*, 2017, vol. 586, pp. 995-1002. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.080
16. Kizil'shtein L.Ya., Levchenko S.V. Impurity elements and environmental problems of coal power engineering. *Thermal Engineering*, 2003, no. 12, pp. 14-19. (In Russian)
17. Xing G., Zhu J., Xiong Z. Ag, Ta, Ru, and Ir enrichment in surface soil: Evidence for land pollution of heavy metal from atmospheric deposition. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, vol. 18, iss. 1, pp. 1-5. DOI: 10.1029/2003GB002123
18. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Technophilicity of chemical elements in the beginning of the 21st century. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5, Geografya* [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography]. 2012, no. 1, pp. 15-22. (In Russian)
19. Aueviriyavit S., Phummiratch D., Maniratanachote R. Mechanistic study on the biological effects of silver and gold nanoparticles in CaCO<sub>2</sub> cells – induction of the Nrf2/HO<sup>1</sup> pathway by high concentrations of silver nanoparticles. *Toxicology Letters*, 2014, vol. 224, iss. 1, pp. 73-83. DOI: 10.1016/j.toxlet.2013.09.020
20. Benn T., Cavanagh B., Histovski K., Posner J.D., Westerhoff P. The release of nanosilver from consumer products used in the home. *Journal of Environmental Quality*, 2010, vol. 39, iss. 6, pp. 1875-1882. DOI: 10.2134/jeq2009.0363
21. Kabata-Pendias A., Trace Elements in Soils and Plants. 4th Edition. Boca Raton, FL, Crc Presspp, 2010, 548 p.
22. Jones K.C., Davies B.E., Peterson P.J. Silver in Welsh soils: Physical and chemical distribution studies. *Geoderma*, 1986, vol. 37, iss. 2, pp. 157-174. DOI: 10.1016/0016-7061(86)90028-5
23. Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Alekseev I.A., Saltykov A.V. Accumulation and distribution of heavy metals and arsenic in the "garden soil-vegetable crops" systems near the vostochny cosmodrome (Zeya river basin, Amurskaya oblast). *Agrokhimiya* [Agrochemistry]. 2015, no. 2, pp. 86-96. (In Russian)
24. Yildirim D., Sasmaz A. Phytoremediation of As, Ag, and Pb in contaminated soils using terrestrial plants grown on Gumuskoy mining area (Kutahya Turkey). *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 182, part B, pp. 228-234. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.11.005
25. Druzhinin A.V., Karelina E.V. The basic types of industrial deposits of silver. *Vestnik RUDN: Seriya inzhenernyye issledovaniya* [The RUDN Vestnik: A series of engineering studies]. 2008, no. 1, pp. 35-41. (In Russian)
26. Gomathi M., Rajkumar P.V., Prakasam A., Ravichandran K. Green synthesis of silver nanoparticles using *Datura stramonium* leaf extract and assessment of their antibacterial activity. *Resource-Efficient Technologies*, 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 280-284. DOI: 10.1016/j.reffit.2016.12.005
27. Liu W., Zeng Z., Chen A., Zeng G., Xiao R., Guo Zh., Yi F., Huang Zh., He K., Hu L. Toxicity effects of silver nanoparticles on the freshwater bivalve *Corbicula fluminea*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, iss. 4, pp. 4236-4244. DOI: 10.1016/j.jece.2018.06.032
28. Reidy B., Haase A., Luch A., Dawson K.A., Lynch I. Mechanisms for the isolation, transformation and toxicity of silver nanoparticles: a critical review of current knowledge and recommendations for future research and applications. *Materials (Basel)*, 2013, vol. 6, iss. 6, pp. 2295-2350. DOI: 10.3390/ma6062295
29. Sayeda A.E.H., Solimanb H.A.M. Developmental toxicity and DNA damaging properties of silver nanoparticles in the catfish (*Clarias gariepinus*). *Mutation Research Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2017, vol. 822, pp. 34-40. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2017.07.002
30. Sharma V.K., Siskova K.M., Zboril R., Gardea-Torresdey J.L. Organic-coated silver nanoparticles in biological and environmental conditions: Fate, stability and toxicity. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, vol. 204, pp. 15-34. DOI: 10.1016/j.cis.2013.12.002
31. Sun C., Yin N., Wen R., Liu W., Jia Y., Hua L., Zhou Q., Jiang G. Silver nanoparticles induced neurotoxicity through oxidative stress in rat cerebral astrocytes is distinct from the effects of silver ions. *NeuroToxicology*, 2016, vol. 52, pp. 210-221. DOI: 10.1016/j.neuro.2015.09.007
32. Vig K., Megharaj M., Sethunathan N., Naidu R. Bioavailability and toxicity of cadmium to microorganisms and their activities in soil: a review. *Advances Environmental Research*, 2003, vol. 8, iss. 1, pp. 121-135. DOI: 10.1016/S1093-0191(02)00135-1
33. Benini S., Cianci M., Mazzei L., Ciurli S. Fluoride inhibition of *Sporosarcina pasteurii* urease: structure and thermodynamics. *Journal Biological Inorganic Chemistry*, 2014, no. 19, pp. 1243-1261. DOI: 10.1007/s00775-014-1182-x
34. Kaya E.D., Söyüt H., Beydemir S. The toxicological impacts of some heavy metals on carbonic anhydrase from gilthead sea bream (*Sparus aurata*) gills. *Environmental*

- Toxicology and Pharmacology*, 2015, vol. 39, iss. 2, pp. 825-832. DOI: 10.1016/j.etap.2015.01.021
35. Liu Y., Zeng G., Zhong H., Wang Z., Liu Z., Cheng M., Liu G., Yang X., Liu S. Effect of rhamnolipid solubilization on hexadecane bioavailability: enhancement or reduction? *Journal Hazardous Materials*, 2017, vol. 322, part B, pp. 394-401. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.10.025
36. Kaczynski P., Lozowicka B., Hrynko I., Wolejko E. Behaviour of mesotrione in maize and soil system and its influence on soil dehydrogenase activity. *Science Total Environmental*, 2016, vol. 571, pp. 1079-1088. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.100
37. Stepniewska Z., Wolińska A., Ziomek J. Response of soil catalase activity to chromium contamination. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, vol 21, iss. 8, pp. 1142-1147. DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62394-3
38. Bowen H.J.M. *Environmental Chemistry of the Elements*, Academic Press, New York, 1979, 333 p.
39. Alekseenko V.A., Alekseenko A.V. *Khimicheskie elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitebnykh landshaftov* [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils of residential landscapes]. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publ., 2013, 380 p. (In Russian)
40. Eivazi F., Afrasiabi Z., Jose E. Effects of Silver Nanoparticles on the Activities of Soil Enzymes Involved in Carbon and Nutrient Cycling. *Pedosphere*, 2018, vol. 28, iss. 2, pp. 209-214. DOI: 10.1016/S1002-0160(18)60019-0
41. Girilal M., Krishnakumar V., Poornima P., Fayazd M.A., Kalaichelvan P.T.A comparative study on biologically and chemically synthesized silver nanoparticles induced Heat Shock Proteins on fresh water fish *Oreochromis niloticus*. *Chemosphere*, 2015, vol. 139, pp. 461-468. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.08.005
42. Smith I, Carson B. *Trace metals in the environment. Silver*. Ann Arbor, MI, Ann Arbor Science Publishers, 1977, vol. 2, 469 p.
43. Cvjetko 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. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, vol. 137, pp. 8-28. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.11.009
44. Tripathi A., Liu S., Kumar S.P., Kumar N., Chandra P.A., Tripathi D.K., Chauhan K. D., Sahi Sh. Differential phytotoxic responses of silver nitrate (AgNO<sub>3</sub>) and silver nanoparticle (AgNps) in *Cucumis sativus* L. *Plant genetic resources*, 2017, vol. 11, part B, pp. 255-264. DOI: 10.1016/j.plgene.2017.07.005
45. Yasur J., Rani P.U. Environmental effects of nanosilver: impact on castor seed germination, seedling growth, and plant physiology. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, iss. 12, pp. 8636-8648. DOI: 10.1007/s11356-013-1798-3
46. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Yu.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, no. 191, pp. 544. DOI: 10.1007/s10661-019-7718-3
47. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Ponomareva S.V. Ranking of Chemical Elements According to Their Ecological Hazard for Soil. *Russian Agricultural Sciences*, 2010, vol. 36, no. 1, pp. 32-34. DOI: 10.3103/S1068367410010106
48. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Effects of Heavy Metal Pollution on the Ecological and Biological Characteristics of Common Chernozem. *Russian Journal of Ecology*. 2000, vol. 31, no. 3, pp. 174-181. DOI: 10.1007/BF02762817
49. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem* [Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems]. Rostov-on-Don, SFU Publ., 2016, 356 p. (In Russian)
50. Minnikova T.V., Sushkova S.N., Mandzhieva S.S., Minkina T.M., Kolesnikov S.I. Assessment of the effect of benz (a) pyrene on the biological activity of chernozem in the Rostov region. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [News of Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering]. 2019, vol. 330, no. 12, pp. 91-102. (In Russian) DOI: 10.18799/24131830/2019/12/2396
51. Chen J., He F., Zhang X., Sun X., Zheng J., Zheng J. Heavy metal pollution decreases microbial abundance, diversity and activity within particle-size fractions of a paddy soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, vol. 87, iss. 1, pp. 164-181. DOI: 10.1111/1574-6941.12212
52. Yang J.S., Yang F.L., Yang Y., Xing G.L., Deng C.P., Shen Y.T., Luo L.Q., Li B.Z., Yuan, H.L. A proposal of "core enzyme" bioindicator in long-term Pb-Zn ore pollution areas based on topsoil property analysis. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 213, pp. 760-769. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.03.030
53. Iram F., Iqbal M.S., Athar M.M., Saeed M.Z., Yasmeen A., Ahmad R. Glucoxytan-mediated green synthesis of gold and silver nanoparticles and their phyto-toxicity study. *Carbohydrate Polymers*, 2014, vol. 104, no. 1, pp. 29-33. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.01.002
54. Langdon K.A., McLaughlin M.J., Kirby J.K., Merrington G. The effect of soil properties on the toxicity of silver to the soil nitrification process. *Environmental and Toxicology Chemistry*, 2014, vol. 33, iss. 5, pp. 1170-1178. DOI: 10.1002/etc.2543
55. Rahmatpour S., Shirvani M., Mosaddeghi M.R., Farshid N., Bazarganipour M. Dose-response effects of silver nanoparticles and silver nitrate on microbial and enzyme activities in calcareous soils. *Geoderma*, 2017, vol. 285, pp. 313-322. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.10.006
56. Salama H.M.H. Effects of silver nanoparticles in some crop plants, Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.). *Journal Biotechnology*, 2012, vol. 3, no. 10, pp. 190-197. Available at: <http://www.interestjournals.org/IRJOB> (accessed 10.09.2019)
57. Kolesnikov S.I., Evreinova A.V., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Changes in the Ecological and Biological Properties of Ordinary Chernozems Polluted by Heavy Metals of the Second Hazard Class (Mo, Co, Cr, and Ni). *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 8, pp. 936-942. DOI: 10.1134/S1064229309080122
58. Kolesnikov S.I., Popovich A.A., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. The Influence of Fluorine, Boron, Selenium, and Arsenic Pollution on the Biological Properties of Ordinary Chernozems. *Eurasian Soil Science*, 2008, vol. 41, no. 4, pp. 400-404. DOI: 10.1134/S1064229308040066

59. Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. *Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv* [Ecology of soils. Teaching about the ecological functions of soils]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 362 p. (In Russian)  
60. Tsepina N.I. *Vliyaniye zagryazneniya serebrom na biologicheskie svoystva pochv Yuga Rossii: avtoreferat*

*dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata biologicheskikh nauk* [The influence of silver pollution on the biological properties of soils in the South of Russia: dissertation abstract for the degree of candidate of biological sciences]. 21 p. (In Russian)

#### КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Сергей И. Колесников участвовал в лабораторно-аналитических исследованиях влияния серебра на биологическое состояние почв юга России, участвовал в написании рукописи статьи. Наталья И. Цепина написала рукопись статьи; участвовала в составлении схемы эксперимента, проведении лабораторного моделирования. Татьяна В. Минникова проанализировала полученные данные, участвовала в написании рукописи статьи. Людмила В. Судына участвовала в проведении лабораторно-аналитического исследования. Камил Ш. Казеев участвовал в отборе почвенных образцов и написании рукописи статьи. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность за плагиат, самоплагиат и другие неэтические проблемы.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

Sergey I. Kolesnikov participated in laboratory and analytical studies of the effect of silver on the biological state of soils in the southern Russia and in writing the article. Natalya I. Tsepina wrote a manuscript of the article; participated in the design of the experiment, laboratory simulation and writing the article. Tatyana V. Minnikova analysed the data obtained and participated in writing the article. Lyudmila V. Sudina participated in a laboratory analytical study. Kamil S. Kazeev participated in the selection of soil samples and the writing of the article. All authors equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

#### NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

#### ORCID

Сергей И. Колесников / Sergey I. Kolesnikov <https://orcid.org/0000-0003-2124-6328>  
Наталья И. Цепина / Natalya I. Tsepina <https://orcid.org/0000-0002-0483-9829>  
Татьяна В. Минникова / Tatyana V. Minnikova <https://orcid.org/0000-0002-9453-7137>  
Людмила В. Судына / Lyudmila V. Sudina <https://orcid.org/0000-0003-3169-8563>  
Камил Ш. Казеев / Kamil S. Kazeev <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>