

Оригинальная статья / Original article  
УДК 631.46;57.044  
DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-130-136

## Оценка экотоксичности наночастиц оксидов кобальта, меди, никеля и цинка по биологическим показателям состояния чернозема обыкновенного

Сергей И. Колесников , Владимир М. Вардуни, Алена Н. Тимошенко,  
Татьяна В. Денисова, Камиль Ш. Казеев, Юлия В. Акименко

Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Иванковского, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

### Контактное лицо

Сергей И. Колесников, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологий им. Д.И. Иванковского, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»; 344090 Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1. Тел. +79185550904  
Email [kolesnikov@sfedu.ru](mailto:kolesnikov@sfedu.ru)  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>

### Формат цитирования

Колесников С.И., Вардуни В.М., Тимошенко А.Н., Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Оценка экотоксичности наночастиц оксидов кобальта, меди, никеля и цинка по биологическим показателям состояния чернозема обыкновенного // Юг России: экология, развитие. 2020. Т.15, N 1. С. 130-136. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-130-136

Получена 10 августа 2019 г.  
Прошла рецензирование 3 октября 2019 г.  
Принята 20 декабря 2019 г.

### Резюме

**Цель.** Оценка воздействия наночастиц оксидов кобальта, никеля, меди, цинка на биологическое состояние чернозема обыкновенного.

**Материал и методы.** Исследование влияния наночастиц  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO на биологические свойства почвы проводили на черноземе обыкновенном (Россия, г. Ростов-на-Дону). Исследовали воздействие различных концентраций загрязняющих веществ в зависимости от содержания их в почве – 3, 10, 30 фонов. Использовали наночастицы  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO размером < 50 нм,  $\text{TiO}_2$  – < 100 нм.

**Результаты.** Загрязнение чернозема обыкновенного  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , CuO, NiO, ZnO и их наночастицами приводит к ухудшению его биологических свойств: снижаются показатели общей численности бактерий, обилия бактерий рода *Azotobacter*, активности каталазы, активности дегидрогеназ, всхожести семян и длины корневой редиса. Оксиды исследуемых элементов оказали примерно равное негативное влияние на данные показатели, в то время как среди нанопорошков наиболее токсичными оказались оксиды меди и цинка, наименее — оксид кобальта. Установлено, что нанопорошки  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , CuO, NiO и ZnO снижают биологические показатели чернозема обыкновенного в большей степени, чем «обычные» формы оксидов. Стимулирующего действия исследуемых веществ на биологические свойства чернозема обыкновенного зафиксировано не было. Это свидетельствует о высокой токсичности исследуемых веществ, что характерно и для наночастиц других элементов.

**Заключение.** Загрязнение наночастицами оксидов кобальта, никеля, меди, цинка оказывает негативное воздействие на биологическое состояние чернозема, более выраженное, чем загрязнение «обычными» формами этих оксидов.

### Ключевые слова

Загрязнение, почва, нанопорошки, биотестирование, тяжелые металлы.

# Estimation of Ecotoxicity of Nanoparticles of Cobalt, Copper, Nickel and Zinc Oxides on Biological Indicators of the State of Ordinary Chernozem

Sergey I. Kolesnikov , Vladimir M. Varduni, Alena N. Timoshenko, Tatiana V. Denisova, Kamil Sh. Kazeev and Yuliya V. Akimenko

D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, South Federal University, Rostov-on-Don, Russia

## Principal Contact

Sergey I. Kolesnikov, Dr Agric. Sciences, Professor and Head, Department of Ecology and Nature Management, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University; 194/1 Stachki Ave., Rostov-on Don, 344006 Russia.

Tel. +79185550904

Email [kolesnikov@sfedu.ru](mailto:kolesnikov@sfedu.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>

## How to cite this article

Kolesnikov S.I., Varduni V.M., Timoshenko A.N., Denisova T.V., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Estimation of ecotoxicity of nanoparticles of cobalt, copper, nickel and zinc oxides on biological indicators of the state of ordinary chernozem.

*South of Russia: ecology, development.* 2020, vol. 15, no. 1, pp. 130-136. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-130-136

Received 10 August 2019

Revised 3 October 2019

Accepted 20 December 2019

## Abstract

**Aim.** Assessment of the effect of nanoparticles of oxides of cobalt, nickel, copper, zinc on the biological state of ordinary chernozem.

**Material and Methods.** The effect of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$  and  $\text{ZnO}$  nanoparticles on the biological properties of soil was studied on ordinary chernozem (Rostov-on-Don, Russia). We studied the effect of various concentrations of pollutants depending on their content in soil of 3, 10, 30 backgrounds.  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$  and  $\text{ZnO}$  nanoparticles with a size of <50 nm and  $\text{TiO}_2$  of <100 nm.

**Results.** Contamination of ordinary chernozem by  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$  and  $\text{ZnO}$  and their nanoparticles leads to a deterioration in its biological properties in terms of: total bacteria numbers; abundance of bacteria of the genus *Azotobacter*; activity of catalase; activity of dehydrogenases and decrease in seed germination and length of radish roots. The oxides of the elements under study had an approximately equal negative effect on these indicators, while among the nanopowders the most toxic were the oxides of copper and zinc and the least was cobalt oxide. It was established that the nanopowders of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$ , and  $\text{ZnO}$  reduce the biological indices of ordinary chernozem to a greater extent than the 'conventional' forms of oxides. A stimulating effect of the studied substances on the biological properties of ordinary chernozem was not recorded. This indicates a high toxicity of the studied substances, which is also characteristic of nanoparticles of other elements.

**Conclusion.** Contamination by nanoparticles of oxides of cobalt, nickel, copper and zinc has a negative effect on the biological state of chernozem and is more pronounced than contamination by 'conventional' forms of these oxides.

## Key Words

Pollution, soil, nanopowders, biotesting, heavy metals.

**ВВЕДЕНИЕ**

Наночастицы используются в различных промышленных и бытовых целях, что непременно отражается на увеличении объема их производства, а, следовательно, приводит к все большему поступлению наночастиц в окружающую среду и возникновению риска потенциально неблагоприятных влияний в естественных системах. За последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в понимании источников, судьбы и эффектов наночастиц. Однако воздействию наночастиц на компоненты окружающей среды, в частности почву, уделено недостаточно внимания [1]. Поэтому необходима разработка экспериментальных методов оценки влияния наночастиц на почвенный микробиоценоз и биологическую активность почвы [2].

Цель настоящей работы состоит в оценке воздействия наночастиц оксидов кобальта, никеля, меди, цинка на биологическое состояние чернозема обыкновенного.

**МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Исследование влияния наночастиц  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO на биологические свойства почвы проводили на черноземе обыкновенном, отобранном в Ботаническом саду Южного федерального университета (Россия, г. Ростов-на-Дону). Отбор почвы был произведен

из пахотного слоя (0-25 см). Для изучения биологических свойств проводили следующие анализы: определение ферментативной активности почвы (активности каталазы и дегидрогеназ), микробиологических показателей (общей численности бактерий и обилие бактерий рода *Azotobacter*) и фитотоксических показателей (всхожесть и длина корней редиса). Исследовали воздействие различных концентраций загрязняющих веществ в зависимости от содержания их в почве – 3, 10, 30 фонов. Использовали наночастицы  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO размером < 50 нм,  $\text{TiO}_2$  < 100 нм. Для оценки степени токсичности наночастиц  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO проводили сравнение с влиянием «обычных», ненаноформ оксидов этих элементов. Для того, чтобы установить общую закономерность влияния оксидов металлов и их нанопорошков на состояние чернозема в зависимости от параметров загрязнения по исследованным показателям, был рассчитан интегральный показатель биологического состояния (ИПБС).

**ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

В результате исследования установлено, что наночастицы  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO во всех вариантах эксперимента вызывали ухудшение биологических свойств чернозема обыкновенного (табл. 1-3).

**Таблица 1.** Изменение ферментативной активности чернозема обыкновенного при загрязнении  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO и их наночастицами, % от контроля

**Table 1.** Change of enzymatic activity of ordinary chernozem through pollution of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO and ZnO and their nanoparticles, % of control

Вещество Substance	Доза загрязняющего вещества / Dose of polluting substance				НСП <sub>0,05</sub>
	Контроль Control	100 мг/кг 100 mg/kg	1000 мг/кг 1000 mg/kg	10000 мг/кг 10000 mg/kg	
<b>Активность каталазы / Catalase activity</b>					
$\text{Co}_3\text{O}_4$	100	86	77	75	7
NiO	100	93	75	69	7
CuO	100	75	67	63	6
ZnO	100	75	65	60	6
$\text{Co}_3\text{O}_4$ нано / $\text{Co}_3\text{O}_4$ nano	100	96	73	70	7
NiO нано / NiO nano	100	91	63	59	6
CuO нано / CuO nano	100	72	62	56	6
ZnO нано / ZnO nano	100	75	69	62	6
<b>Активность дегидрогеназ / Dehydrogenase activity</b>					
$\text{Co}_3\text{O}_4$	100	77	58	65	6
NiO	100	88	77	65	7
CuO	100	78	62	44	5
ZnO	100	78	73	61	6
$\text{Co}_3\text{O}_4$ нано / $\text{Co}_3\text{O}_4$ nano	100	91	79	61	7
NiO нано / NiO nano	100	78	73	53	6
CuO нано / CuO nano	100	76	60	40	5
ZnO нано / ZnO nano	100	77	75	57	6

Исследование показало, что на активность каталазы и дегидрогеназ в черноземе обыкновенном наночастицы NiO, CuO и ZnO оказывают более сильное влияние, чем их обычные оксиды, а  $\text{Co}_3\text{O}_4$  и его наночастицы примерно в равной степени повлияли на данный показатель. Более сильное влияние наночастиц по сравнению с их обычными формами отмечается и другими исследователями [3]. Наиболее токсичным веществом по отношению к активности ферментов оказался нанопорошок оксида меди. По степени ингибирования активности

каталазы вещества образуют следующие ряды: оксиды –  $\text{ZnO} \geq \text{CuO} > \text{NiO} \geq \text{Co}_3\text{O}_4$ , нанопорошки оксидов –  $\text{CuO} > \text{ZnO} \geq \text{NiO} > \text{Co}_3\text{O}_4$ . Ранжирование веществ по степени ингибирования активности дегидрогеназ дало следующие ряды: оксиды –  $\text{CuO} > \text{Co}_3\text{O}_4 > \text{ZnO} > \text{NiO}$ , нанопорошки оксидов –  $\text{CuO} > \text{NiO} \geq \text{ZnO} > \text{Co}_3\text{O}_4$ .

При загрязнении чернозема обыкновенного  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO и их нанопорошками снижаются общая численность бактерий и обилие бактерий рода *Azotobacter* (табл. 2).

**Таблица 2.** Изменение микробиологических показателей чернозема обыкновенного при загрязнении  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO и их наночастицами, % от контроля

**Table 2.** Change of microbiological indicators of ordinary chernozem through pollution of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO and ZnO and their nanoparticles, % of control

Вещество Substance	Доза загрязняющего вещества / Dose of polluting substance				HCP <sub>0,05</sub>
	Контроль Control	100 мг/кг 100 mg/kg	1000 мг/кг 1000 mg/kg	10000 мг/кг 10000 mg/kg	
<b>Общая численность бактерий / Total number of bacteria</b>					
$\text{Co}_3\text{O}_4$	100	59	51	30	9
NiO	100	73	49	38	10
CuO	100	89	70	51	13
ZnO	100	54	41	24	8
$\text{Co}_3\text{O}_4$ нано / $\text{Co}_3\text{O}_4$ nano	100	57	46	27	8
NiO нано / NiO nano	100	65	43	35	9
CuO нано / CuO nano	100	57	38	24	8
ZnO нано / ZnO nano	100	51	35	19	7
<b>Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i> / Abundance of bacteria of <i>Azotobacter</i> genus</b>					
$\text{Co}_3\text{O}_4$	100	100	90	75	16
NiO	100	95	85	75	16
CuO	100	95	85	75	16
ZnO	100	95	80	70	15
$\text{Co}_3\text{O}_4$ нано / $\text{Co}_3\text{O}_4$ nano	100	90	80	70	15
NiO нано / NiO nano	100	95	85	75	16
CuO нано / CuO nano	100	95	85	70	15
ZnO нано / ZnO nano	100	90	80	55	14

Наиболее сильное влияние на общую численность бактерий оказали наночастицы оксида меди и оксида цинка. По степени отрицательного влияния на общую численность бактерий вещества образуют следующие ряды: оксиды –  $\text{ZnO} > \text{Co}_3\text{O}_4 > \text{NiO} > \text{CuO}$ , нанопорошки оксидов –  $\text{ZnO} > \text{CuO} > \text{Co}_3\text{O}_4 > \text{NiO}$ .

Обилие бактерий рода *Azotobacter* в черноземе обыкновенном снизилось примерно в равной степени при загрязнении оксидами  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO и их нанопорошками. По степени негативного влияния на

обилие бактерий рода *Azotobacter* вещества образуют следующие ряды: оксиды –  $\text{ZnO} > \text{Co}_3\text{O}_4 = \text{NiO} = \text{CuO}$ , нанопорошки оксидов –  $\text{ZnO} > \text{CuO} = \text{Co}_3\text{O}_4 \geq \text{NiO}$ .

Снижение роста бактерий и общей биомассы под влиянием наночастиц установлено и в других исследованиях [4-6].

При загрязнении чернозема обыкновенного  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO и их нанопорошками отмечается снижение таких показателей как всхожесть и длина корней редиса сказалось загрязнение (табл. 3).

**Таблица 3.** Влияние загрязнения  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO и их наночастицами на фитотоксические показатели чернозема обыкновенного, % от контроля

**Table 3.** The impact of pollution of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO and ZnO and their nanoparticles on phytotoxic indicators of ordinary chernozem, % of control

Вещество Substance	Доза загрязняющего вещества Dose of polluting substance				HCP <sub>0,05</sub>
	Контроль Control	100 мг/кг 100 mg/kg	1000 мг/кг 1000 mg/kg	10000 мг/кг 10000 mg/kg	
<b>Всхожесть редиса / Radish seed germination</b>					
$\text{Co}_3\text{O}_4$	100	88	80	65	14
NiO	100	95	83	53	14
CuO	100	95	80	73	15
ZnO	100	88	80	75	15
$\text{Co}_3\text{O}_4$ нано / $\text{Co}_3\text{O}_4$ nano	100	85	75	55	13
NiO нано / NiO nano	100	90	85	60	14
CuO нано / CuO nano	100	78	65	55	12
ZnO нано / ZnO nano	100	83	75	50	13
<b>Длина корней редиса / Length of radish root</b>					
$\text{Co}_3\text{O}_4$	100	79	62	48	12
NiO	100	73	60	37	11
CuO	100	81	69	31	11
ZnO	100	67	56	44	11
$\text{Co}_3\text{O}_4$ нано / $\text{Co}_3\text{O}_4$ nano	100	77	67	58	13

<b>NiO нано</b> / NiO nano	100	63	57	45	10
<b>CuO нано</b> / CuO nano	100	63	58	35	10
<b>ZnO нано</b> / ZnO nano	100	61	50	44	10

Установлено отрицательное влияние оксидов  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO и их нанопорошков на фитотоксические показатели почвы: снижаются всхожесть и длина корней редиса. Негативное влияние наночастиц на растения отмечалось ранее и другими исследователями [7-10]. Установлены следующие ряды токсичности по степени негативного влияния на показатель всхожести редиса: оксиды –  $\text{Co}_3\text{O}_4 = \text{NiO} > \text{ZnO} \geq \text{CuO}$ , нанопорошки оксидов –  $\text{CuO} > \text{ZnO} > \text{Co}_3\text{O}_4 > \text{NiO}$ . По степени негативного влияния на длину корней редиса вещества образуют следующую последовательность: оксиды –

$\text{ZnO} > \text{Co}_3\text{O}_4 > \text{NiO} > \text{CuO}$ , нанопорошки оксидов –  $\text{ZnO} = \text{NiO} > \text{CuO} \geq \text{Co}_3\text{O}_4$ .

Для того, чтобы установить общую закономерность влияния оксидов металлов и их нанопорошков на состояние чернозема в зависимости от параметров загрязнения был рассчитан интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) по показателям: общая численность бактерий, численность бактерий рода *Azotobacter*, активность каталазы, активность дегидрогеназ, всхожесть редиса, длина корней редиса (табл. 4).

**Таблица 4.** Изменение интегрального показателя биологического состояния (ИПБС) чернозема обыкновенного при загрязнении  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO и ZnO и их наночастицами, % от контроля

**Table 4.** Change of the integrated indicator of biological state (IIBS) of the ordinary chernozem through pollution of  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , NiO, CuO and ZnO and their nanoparticles, % of control

Вещество Substance	Контроль Control	100 мг/кг 100 mg/kg	1000 мг/кг 1000 mg/kg	10000 мг/кг 10000 mg/kg	Среднее для 3-х доз Average for 3 doses
<b><math>\text{Co}_3\text{O}_4</math></b>	100	83	72	62	72
<b>NiO</b>	100	88	74	59	74
<b>CuO</b>	100	87	75	58	73
<b>ZnO</b>	100	79	69	59	69
<b><math>\text{Co}_3\text{O}_4</math> нано / <math>\text{Co}_3\text{O}_4</math> nano</b>	100	84	71	58	71
<b>NiO нано / NiO nano</b>	100	82	69	57	69
<b>CuO нано / CuO nano</b>	100	77	64	50	63
<b>ZnO нано / ZnO nano</b>	100	76	67	52	65

По результатам ИПБС наночастицы исследуемых веществ оказались более токсичны, чем их оксиды. В большинстве случаев, чем выше концентрация металла в почве, тем сильнее снижается ее биологическая активность. Аналогичная закономерность наблюдается и для наночастиц других веществ [3; 11; 12]. По степени влияния на снижение биологической активности чернозема обыкновенного вещества образуют следующие ряды: оксиды –  $\text{ZnO} \geq \text{Co}_3\text{O}_4 \geq \text{CuO} \geq \text{NiO}$ , нанопорошки оксидов –  $\text{CuO} \geq \text{ZnO} > \text{NiO} > \text{Co}_3\text{O}_4$ . Таким образом, оксиды исследуемых элементов примерно в равной степени снижали биологические показатели, а среди их нанопорошков наиболее токсичными оказались оксиды меди и цинка, наименее – оксид кобальта.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение чернозема обыкновенного  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , CuO, NiO, ZnO и их наночастицами приводит к ухудшению его биологических свойств: снижаются показатели общей численности бактерий, обилия бактерий рода *Azotobacter*, активности каталазы, активности дегидрогеназ, всхожести семян и длины корней редиса.

Оксиды исследуемых элементов оказали примерно равное негативное влияние на данные показатели, в то время как среди нанопорошков наиболее токсичными оказались оксиды меди и цинка, наименее – оксид кобальта.

Нанопорошки  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , CuO, NiO и ZnO снижают биологические показатели чернозема обыкновенного в большей степени, чем «обычные» формы оксидов.

Стимулирующего действия исследуемых веществ на биологические свойства чернозема обыкновенного зафиксировано не было. Это свидетельствует о высокой токсичности исследуемых веществ, что характерно и для наночастиц других элементов.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при государственной поддержке ведущей научной школы Российской Федерации (НШ-2511.2020.11) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Южного федерального университета на 2020-2022 годы (№ FENW-2020-0028).

#### ACKNOWLEDGEMENT

The study was undertaken with state support of the leading scientific school of the Russian Federation (NSH-2511.2020.11) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of state task of Southern Federal University for 2020-2022 (№ FENW-2020-0028).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Bundschuh M., Filser J., Lüderwald S., McKee M.S., Metreveli G., Schaumann G.E., Schulz R., Wagner S. Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to? // Environmental Sciences Europe. 2018. V. 30. N 6. DOI: 10.1186/s12302-018-0132-6
- Терехова В.А. Биотестирование почв: подходы и проблемы // Почвоведение. 2011. N 2. С. 190-198.

3. Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Влияние загрязнения наночастицами оксидов никеля и железа на биологические свойства чернозема обыкновенного североприазовского // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2016. N 1. С. 71-75.
4. Скутарь А.И., Кофтина В.А. Влияние наночастиц железа на колониеобразующую способность *E. Coli*. // Бюллетень медицинских интернет-конференций. 2016. Т. 6. N 5. 512 с.
5. Simonin M., Richaume A. Impact of engineered nanoparticles on the activity, abundance, and diversity of soil microbial communities: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. V. 22. P. 13710-13723. DOI: 10.1007/s11356-015-4171-x
6. Якушева Е.В., Сизова Е.А., Гавриш И.А., Лебедев С.В., Каюмов Ф.Г. Действие наночастиц  $Al_2O_3$  на почвенный микробиоценоз, состояние антиоксидантной системы и микрофлору кишечника красного калифорнийского червя (*Eisenia Foetida*) // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. N 1. С.191-199.
7. Терехова В.А., Гладкова М.М. Инженерные наноматериалы в почве: проблемы оценки их воздействия на живые организмы // *Почвоведение*. 2014. N 1. С. 82-90. DOI: 10.7868/S0032180X14010122
8. Ghosh M., Bhadra S., Adegoke A., Bandyopadhyay M., Mukherjee A. MWCNT uptake in *Allium cepa* root cells induces cytotoxic and genotoxic responses and results in DNA hyper-methylation // *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2015. N 774. P. 49-58. DOI: 10.1016/j.mrfmmm.2015.03.004
9. Josko I., Oleszczuk P., Skwarek E. Toxicity of combined mixtures of nanoparticles to plants // *Hazardous Materials*. 2017. V. 331. P. 200-209. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.028
10. 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
11. Тимошенко А.Н., Колесников С.И., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Изменение биологических показателей серопесков после загрязнения наночастицами Cu, Zn и Ni // *Известия Высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2019. N 2. С. 106-110. DOI: 10.23683/0321-3005-2019-2-106-111
12. 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
2. Terekhova V.A. Soil bioassay: Problems and approaches. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]*. 2011, no. 2, pp. 190-198. (In Russian)
3. Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. Effects of Pollution by Nanoparticles of Nickel and Iron Oxides on Biological Properties of Ordinary Chernozem. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki [Bulletin of Higher Education Institutes North Caucasus Region. Natural Sciences]*. 2016, no. 1, pp. 71-75. (In Russian)
4. Skutar A.I., Koftina V.A. Influence of nanoparticles of iron on the colony forming ability of *E. Coli*. *Byulleten' meditsinskikh internet-konferentsii [Bulletin of Medical Internet Conferences]*. 2016, vol. 6, no. 5, 512 p. (In Russian)
5. Simonin M., Richaume A. Impact of engineered nanoparticles on the activity, abundance, and diversity of soil microbial communities: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, pp. 13710-13723. DOI: 10.1007/s11356-015-4171-x
6. Yakusheva E.V., Sizova E.A., Gavrish I.A., Lebedev S.V., Kayumov F.G. The effect of  $A_2O_3$  nanoparticles on the soil microbiocenosis, the state of the antioxidant system and the intestinal microflora of the red Californian worm (*Eisenia foetida*). *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*. 2017, vol. 52, no. 1, pp. 191-199. (In Russian)
7. Terekhova V.A., Gladkova M.M. Engineered nanomaterials in soil: Problems in assessing their effect on living organisms. *Eurasian Soil Science*, 2014, no. 1, pp. 82-90. (In Russian) DOI: 10.7868/S0032180X14010122
8. Ghosh M., Bhadra S., Adegoke A., Bandyopadhyay M., Mukherjee A. MWCNT uptake in *Allium cepa* root cells induces cytotoxic and genotoxic responses and results in DNA hyper-methylation. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 2015, no. 774, pp. 49-58. DOI: 10.1016/j.mrfmmm.2015.03.004
9. Josko I., Oleszczuk P., Skwarek E. Toxicity of combined mixtures of nanoparticles to plants. *Hazardous Materials*, 2017, vol. 331, pp. 200-209. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.02.028
10. 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. Tymoshenko A.N., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. The change in the biological indicators of gray sand after contamination with nanoparticles Cu, Zn and Ni. *Bulletin of Higher Education Institutes North Caucasus Region. Natural Sciences*, 2019, no. 2, pp. 106-110. (In Russian) DOI: 10.23683/0321-3005-2019-2-106-111
12. Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh., Akimenko Y.V., Myasnikova M.A. Ecotoxicity of Copper, Nickel, and Zinc Nanoparticles Assessment on the Basis of Biological Indicators of Chernozems. *Eurasian Soil Science*, 2019, no. 8, pp. 986-992. (In Russian) DOI: 10.1134/S0032180X19080094

## REFERENCES

1. Bundschuh M., Filser J., Lüderwald S., McKee M.S., Metreveli G., Schaumann G.E., Schulz R., Wagner S. Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to? *Environmental Sciences Europe*, 2018, vol. 30, no. 6. DOI: 10.1186/s12302-018-0132-6



**КРИТЕРИИ АВТОРСТВА**

Сергей И. Колесников разработал концепцию и осуществлял общее руководство исследованием. Владимир М. Вардуни, Алена Н. Тимошенко, Юлия В. Акименко участвовали в планировании эксперимента, проводили лабораторное моделирование загрязнения почвы и лабораторно-аналитические исследования биологических показателей состояния почвы. Владимир М. Вардуни, Алена Н. Тимошенко, Татьяна В. Денисова, Камил Ш. Казеев и Юлия В. Акименко участвовали в планировании эксперимента, в анализе и интерпретации данных, в корректуре рукописи до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность за плагиат и самоплагиат.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**AUTHOR CONTRIBUTIONS**

Sergey I. Kolesnikov developed the concept and oversaw the research. Vladimir M. Varduni, Alena N. Timoshenko, Yuliya V. Akimenko participated in the design of the experiment, conducted laboratory modeling of soil contamination and laboratory and analytical studies of biological indicators of soil conditions. Vladimir M. Varduni, Alena N. Timoshenko, Tatiana V. Denisova, Kamil Sh. Kazeev and Yuliya V. Akimenko participated in the design of the experiment, in the analysis and interpretation of the data and in the proofreading of the manuscript before being submitted to the Editor. All authors participated equally in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism and self-plagiarism.

**NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION**

The authors state that there is no conflict of interest.

**ORCID**

Сергей И. Колесников / Sergey I. Kolesnikov <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>  
Владимир М. Вардуни / Vladimir M. Varduni <https://orcid.org/0000-0002-7822-5854>  
Алена Н. Тимошенко / Alena N. Timoshenko <https://orcid.org/0000-0001-5589-2171>  
Татьяна В. Денисова / Tatiana V. Denisova <http://orcid.org/0000-0002-9595-7205>  
Камил Ш. Казеев / Kamil Sh. Kazeev <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212>  
Юлия В. Акименко / Yuliya V. Akimenko <https://orcid.org/0000-0002-5671-5270>