

ОЦЕНКА ЭКОТОКСИЧНОСТИ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ

**¹А.Н. Тимошенко, ¹С.И. Колесников, ¹В.М. Вардуни,
¹Т.А. Тер-Мисакянц, ¹Е.Н. Неведомая, ¹К.Ш. Казеев**

¹Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского Южного федерального университета

Представлена оценка экотоксичности наночастиц Cu и CuO по биологическим показателям состояния почвы как центрального биогеохимического звена наземных экосистем. Исследовали почвы, существенно различающиеся по свойствам, определяющим их устойчивость к загрязнению тяжелыми металлами: чернозем обыкновенный, серопески и бурую лесную почву. Загрязнение наночастицами Cu и CuO приводило к ухудшению биологических свойств почв. Наблюдалось достоверное снижение всех исследованных биологических показателей. Достоверных случаев гормезиса зафиксировано не было. Наночастицы CuO меди проявили большую экотоксичность, чем микрочастицы CuO. По степени устойчивости к загрязнению наночастицами Cu исследованные почвы образовали следующий ряд: чернозем обыкновенный > бурые лесные почвы > серопески. Легкий гранулометрический состав серопесков и кислая реакция среды бурых лесных почв, а также низкое содержание в этих почвах органического вещества способствуют высокой подвижности, а, следовательно, и высокой экотоксичности меди в этих почвах. Наночастицы CuO в меньшей степени повлияли на биологическое состояние чернозема обыкновенного, чем наночастицы Cu.

Ключевые слова: наночастицы, загрязнение, медь, биотестирование, нормирование, устойчивость, почвы

Статья поступила в редакцию 20.07.2020, доработана 20.01.2021, принята к публикации 02.02.2021

Assessment of Ecotoxicity of Copper Nanoparticles

**¹A.N. Timoshenko, ¹S.I. Kolesnikov, ¹V.M. Varduni, ¹T.A. Ter-Misakyants,
¹E.N. Nevedomaya, ¹K.Sh. Kazeev**

¹Academy of Biology and Biotechnology D.I. Ivanovsky Southern Federal University, 344090 Rostov-On-Don, Russia

An assessment of the ecotoxicity of Cu nanoparticles and CuO was carried out on biological indicators of soil condition as the central biogeochemical link of terrestrial ecosystems. They studied soils that differ significantly in the properties that determine their resistance to pollution by heavy metals: common chernozem, seropesky and brown forest soil. Contamination with Cu and CuO nanoparticles led to a deterioration in the biological properties of soils. There was a significant decrease in all the biological indicators studied. No reliable cases of hormesis were recorded. Nanoparticles of CuO of copper showed big ecotoxicity, than CuO microparticles. According to the degree of resistance to contamination with Cu nanoparticles, the studied soils formed the following series: common chernozem > brown forest soils > seropesky. The light particle size distribution of seropescus and the acidic reaction of the environment of brown forest soils, as well as the low content of organic matter in these soils, contribute to the high mobility, and therefore high ecotoxicity, of copper in these soils. CuO nanoparticles affected the biological state of common chernozem to a lesser extent than Cu nanoparticles.

Keywords: nanoparticles, contamination, copper, biotesting, rationing, stability, soils

Received 20.07.2020, revised 20.01.2021, accepted for publication 02.02.2021

DOI: 10.18412/1816-0395-2021-4-61-65

Недавнее быстрое развитие нанотехнологий усилило озабоченность по поводу воздействия искусственных наночастиц на окружающую среду и биоту. Большую часть из более чем 11 млн т наноматериалов, производимых ежегодно, составляют наночастицы металлов и оксидов металлов, которые в конечном итоге попадают в почву. Одним

из лидеров в применении нанопорошков являются наночастицы меди. Медьсодержащие наноматериалы используются во многих областях промышленности, в результате деятельности которых наночастицы меди попадают в окружающую среду, в том числе в почву [1].

Установлено, что наночастицы меди отрицательно влияют на ферментативную активность

почвы [2, 3], численность бактерий [4, 5] и растения [6]. Несмотря на то, что в последние годы токсичности наночастиц уделяется значительное внимание, все еще многие вопросы, связанные с их потенциальной опасностью, остаются нерешенными.

Цель работы — оценить экотоксичность наночастиц меди по биологическим показателям со-

Таблица 1. Характеристика и места отбора почв

Table 1. Soil sampling characteristics and locations

Почва	Экосистема	pH	Место отбора	Координаты
Чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый	Пашня	7,8	Ботанический сад ЮФУ, г. Ростов-на-Дону	47°14'17.54" с.ш., 39°38'33.22" в.д.
Чернозем обыкновенный супесчаный (серопески)	Разнотравно-злаковая степь на песках	6,8	Ростовская область, Усть-Донецкий р-н, ст. Верхнекудзюченская	47° 46.015' с.ш., 40° 51.700' в.д.
Буряя лесная кислая (тяжелосуглинистая)	Буково-грабовый лес	5,8	Республика Адыгея, окрестности п. Никель	44° 10.649' с.ш., 40° 9.469' в.д.

Таблица 2. Биологические показатели чернозема обыкновенного при различной дозе загрязнений микрочастицами и наночастицами CuO

Table 2. Biological indicators of ordinary chernozem at different contamination levels with CuO microparticles and nanoparticles

Загрязнение	Доза загрязняющего вещества				НСР _{0,05}
	Контроль	3 фона	10 фонов	30 фонов	
Общая численность бактерий, %					
CuO (микро)	100	89	70	51	13
CuO (нано)	100	57	38	24	8
Обилие бактерий рода Azotobacter, %					
CuO (микро)	100	95	85	75	16
CuO (нано)	100	95	85	70	15
Активность каталазы, %					
CuO (микро)	100	75	67	63	6
CuO (нано)	100	72	62	56	6
Активность дегидрогеназ, %					
CuO (микро)	100	78	62	44	5
CuO (нано)	100	76	60	40	5
Всхожесть, %					
CuO (микро)	100	95	80	73	15
CuO (нано)	100	78	65	55	12
Длина корней редиса, % от контроля					
CuO (микро)	100	81	69	31	11
CuO (нано)	100	63	58	35	10
ИПБС почвы, % от контроля					
CuO (микро)	100	87	75	58	73*
CuO (нано)	100	77	64	50	63*
*Среднее для трех доз.					

*Среднее для трех доз.

стояния почвы как центрального биогеохимического звена наземных экосистем.

Объекты и методы исследования

Загрязнение наночастицами меди моделировали в лабораторных условиях. Было проведено два модельных эксперимента. В ходе первого модельного опыта исследовали влияние микрочастиц CuO и наночастиц CuO на чернозем обыкновенный в концентрациях 3, 10 и 30 фонов (фоновое содержание Cu в использованном черноземе обыкновенном составляет 41,13 мг/кг). В ходе второго эксперимента было изучено влияния разных концентраций наночастиц Cu (100,

1000, 10000 мг/кг) на почвы трёх типов: чернозем обыкновенный тяжелосуглинистый, чернозем супесчаный обыкновенный (серопески), бурые лесные кислые почвы. Эти почвы различаются по своим эколого-генетическим свойствам, а, соответственно, и по устойчивости к загрязнению наночастицами металлов (табл. 1).

Образцы почв для модельных экспериментов отбирали из верхнего слоя 0–10 см, так как именно в этом слое задерживается большая часть загрязняющих веществ.

Почву инкубировали в вегетационных сосудах при комнатной температуре (20–22 °C) и оптимальном увлажнении (60 % полевой влагоемкости) в трех-

кратной повторности. Состояние почв определяли через 10 сут после загрязнения.

Лабораторно-аналитические исследования выполнены с использованием общепринятых в биологии почв методов [7]. Общую численность бактерий в почве учитывали методом прямого люминесцентного микроскопирования по Звягинцеву и Кожевину на микроскопе "Микмед-11", обилие бактерий рода *Azotobacter* — методом комочков обрастания на среде Эшби, активность каталазы — по скорости разложения пероксида водорода по методу Галстяна, активность дегидрогеназ — по скорости окисления трифенилтетразолия хлористого по методу Галстяна в модификации Хазиева, фитотоксичность почв — по всхожести и длине корней редиса сорта "Жара".

На основе вышеперечисленных биологических показателей определяли интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы [7].

Степень информативности показателя оценивали по тесноте корреляции между показателем и содержанием в почве загрязняющего вещества.

Чувствительность показателей определяли путем анализа степени снижения его значений в вариантах с загрязнением по сравнению с контролем.

Результаты исследования

Загрязнение чернозема обыкновенного микро- и наночастицами CuO привело к ухудшению его биологического состояния. Степень снижения зависела от природы загрязняющего вещества и его концентрации в почве (табл. 2).

На общую численность бактерий, активность каталазы и дегидрогеназ, всхожесть и длину корней семян редиса во всех исследуемых концентрациях наночастицы оксида меди оказали более сильное влияние, чем микрочастицы оксида меди. На обилие бактерий рода *Azotobacter* оксид меди и его наноформа оказали равное влияние в концентрациях 3 и 10 фонов. Увеличение дозы загрязняющего вещества до 30 фонов привело к более сильному влиянию наночастицы оксида меди. Наноча-

стицы CuO проявили большую экотоксичность, чем микрочастицы. Такая закономерность наблюдается не для всех тяжелых металлов [8].

Наиболее информативным показателем при загрязнении почвы оксидом меди и его наночастицами является обилие бактерий рода *Azotobacter* (табл. 3.)

Наиболее высокую чувствительность к загрязнению чернозема обыкновенного микро- и наночастицами CuO проявляет показатель общей численности бактерий (табл. 4).

В ходе исследования было проанализировано влияние наночастиц меди на биологические свойства трех почв: чернозема обыкновенного, серопесков и бурой лесной почвы. Было установлено, что привнесение даже минимальной исследованной дозы (100 мг/кг) вызывает резкое снижение исследуемых показателей. Чем выше концентрация загрязняющего вещества, тем сильнее ухудшаются биологические свойства исследуемых почв (табл. 5).

В результате загрязнения наночастицами Cu наблюдалось снижение общей численности бактерий, обилия бактерий рода *Azotobacter*, активности каталазы и дегидрогеназ, всхожести и длины корней редиса.

При загрязнении наночастицами Cu в концентрации 100 и 1000 мг/кг общая численность бактерий наиболее сильно снижалась на серопесках. В концентрации же 10000 мг/кг на серопесках отмечается тенденция к восстановлению данного показателя и они оказываются наиболее устойчивы среди исследованных почв. В концентрации 10000 мг/кг отмечается полное подавление численности бактерий рода *Azotobacter*. По степени устойчивости данного показателя к загрязнению наночастицами Cu почвы образуют следующий ряд: чернозем обыкновенный > бурые лесные почвы > серопески. Такая же последовательность почв образуется и при загрязнении почв макрочастицами меди [9].

Как отмечают многие исследователи, информация о механизмах токсичности наночастиц для бактерий незначительна [10].

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (r) между загрязнением микро- и наночастицами CuO и его биологическими свойствами

Table 3. CuO micro- and nanoparticles pollution and its biological properties correlation coefficients (r)

Показатель	Микрочастицы CuO	Наночастицы CuO
Общая численность бактерий	-0,95	-0,79
Обилие бактерий р. <i>Azotobacter</i>	-0,95	-0,98
Активность каталазы	-0,71	-0,75
Активность дегидрогеназ	-0,90	-0,90
Всхожесть	-0,91	-0,83
Длина корней редиса	-0,98	-0,84

Примечание. $p < 0,05$.

Таблица 4. Биологические показатели чернозема при загрязнении микро- и наночастицами CuO (среднее для трех доз), % контроля

Table 4. Biological indicators of chernozem contaminated with CuO micro- and nanoparticles (average for three doses), control %

Показатель	Микрочастицы CuO	Наночастицы CuO
Общая численность бактерий	70	40
Обилие бактерий р. <i>Azotobacter</i>	85	83
Активность каталазы	68	63
Активность дегидрогеназ	61	59
Всхожесть	83	69
Длина корней редиса	60	52

Таблица 5. Биологические показатели чернозема обыкновенного, серопесков и бурой лесной почвы при различной дозе загрязнений наночастицами Cu

Table 5. Biological indicators of ordinary chernozem, seropes and brown forest soil at different doses of Cu nanoparticle contamination

Почва	Доза загрязняющего вещества				HCP _{0,05}
	Контроль	100 мг/кг	1000 мг/кг	10000 мг/кг	
Общая численность бактерий, %					
Чернозем обыкновенный	100	55	26	21	6
Серопески	100	49	10	25	5
Бурая лесная	100	52	26	19	6
Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i> , %					
Чернозем обыкновенный	100	95	65	0	7
Серопески	100	77	51	0	10
Бурая лесная	100	77	51	0	10
Активность каталазы, %					
Чернозем обыкновенный	100	73	66	58	6
Серопески	100	85	73	70	7
Бурая лесная	100	67	58	48	6
Активность дегидрогеназ, %					
Чернозем обыкновенный	100	38	35	23	4
Серопески	100	56	46	41	5
Бурая лесная	100	35	33	20	4
Всхожесть, %					
Чернозем обыкновенный	100	62	62	51	10
Серопески	100	30	25	15	8
Бурая лесная	100	58	47	37	11
Длина корней редиса, % контроля					
Чернозем обыкновенный	100	72	58	15	7
Серопески	100	15	24	15	7
Бурая лесная	100	45	38	15	6
ИПБС почвы, % контроля					
Чернозем обыкновенный	100	66	53	28	62*
Серопески	100	48	38	28	54*
Бурая лесная	100	56	42	23	55*
*Среднее для трех доз.					

*Среднее для трех доз.

Таблица 6. Коэффициенты корреляции (r) между загрязнением наночастицами Cu чернозема обыкновенного, серопесков и бурой лесной почвы и их биологическими свойствами**Table 6. Correlation coefficients (r) between contamination by ordinary chernozem Cu nanoparticles, gray sands and brown forest soil and their biological properties**

Показатель	Чернозем обыкновенный	Серопески	Бурая лесная почва
Общая численность бактерий	-0,61*	-0,90*	-0,58
Обилие бактерий р. <i>Azotobacter</i>	-0,96*	-0,67	-0,92*
Активность каталазы	-0,67*	-0,64	-0,64
Активность дегидрогеназ	-0,68*	-0,54	-0,55
Всхожесть	-0,76*	-0,52	-0,62
Длина корней редиса	-0,65	-0,42	-0,68

* $p < 0,05$.**Таблица 7. Биологические показатели чернозема обыкновенного, серопесков и бурой лесной почв при загрязнении наночастицами Cu (среднее для трех доз), % контроля****Table 7. Biological indicators of ordinary chernozem, gray sands and brown forest soils when contaminated with Cu nanoparticles (average for three doses), control %**

Показатель	Чернозем обыкновенный	Серопески	Бурая лесная почва
Общая численность бактерий	34	28	32
Обилие бактерий р. <i>Azotobacter</i>	53	43	43
Активность каталазы	66	76	58
Активность дегидрогеназ	32	48	29
Всхожесть	58	23	47
Длина корней редиса	48	18	33

Основной причиной токсичности для бактерий называют ионы Cu, высвобождаемые из наночастиц CuO [11].

Что касается ферментативной активности почв, то дегидрогеназы оказались более чувствительны к загрязнению наночастицами меди, чем каталаза. Наиболее сильно активность ферментов снизилась в бурых лесных почвах. Серопески же в данном случае проявили себя как самые устойчивые почвы.

Механизм ингибирующего действия наночастиц металлов на ферменты, по-видимому, обусловлен их взаимодействием с сульфгидрильными группами [12].

На всхожесть и длину корней редиса наночастицы Cu наибольший токсический эффект оказали на серопесках. Чернозем обыкновенный оказался самым устойчивым по показателям фитотоксичности к загрязнению наночастицами меди.

Поскольку физические параметры и присутствие химических веществ в разных средах влияют на стабильность наночастиц, они могут вести себя по-разному в разных условиях. Состав наночастиц также может изменять их

свойства и, следовательно, их реактивность, проникновение и транслокацию внутри растения, что может привести к различным реакциям растений на одну и ту же наночастицу [13]. Механизмы токсичности НЧ ТМ для растений связывают с ингибированием основных физиологических процессов, включая фотосинтез, минеральное питание и связь с водой [14].

По результатам ИПБС почв выявлено, что к загрязнению наночастицами меди более устойчив чернозем обыкновенный. Бурые лесные почвы и серопески примерно в равной степени чувствительны к данному веществу.

Наиболее информативным показателем при загрязнении чернозема обыкновенного и бурой лесной почвы наночастицами меди является обилие бактерий рода *Azotobacter*, а при загрязнении бурой лесной почвы — общая численность бактерий (табл. 6.)

Чувствительность показателей к загрязнению наночастицами меди зависела от типа почвы (табл. 7).

При загрязнении чернозема обыкновенного и бурой лесной

почвы наночастицами Cu наиболее чувствительными показателями оказались активность дегидрогеназ и общая численность бактерий, при загрязнении серопесков — длина корней редиса и всхожесть.

При сравнении влияния сопоставимых доз наночастиц CuO и Cu на чернозем обыкновенный было выявлено, что наночастицы меди в оксидной форме сильнее влияют на показатели активности дегидрогеназ и всхожести семян редиса, чем наночастицы меди в металлической форме. На длину корней редиса сильнее повлияли наночастицы CuO, чем Cu. Общая численность бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter* и активность каталазы оказались в равной степени чувствительны к загрязнению оксидной и металлической формами наночастиц меди. Если судить по ИПБС почвы, то наночастицы CuO в меньшей степени повлияли на биологическое состояние чернозема обыкновенного, чем наночастицы Cu.

Выводы

Загрязнение чернозема обыкновенного наночастицами Cu и CuO привело к ухудшению его биологических свойств. Как правило, наблюдали достоверное снижение всех исследованных биологических показателей. Достоверных случаев гормезиса зафиксировано не было.

Наночастицы CuO проявили большую экотоксичность, чем микрочастицы CuO.

По степени устойчивости к загрязнению наночастицами Cu исследованные почвы образовали следующий ряд: чернозем обыкновенный > бурые лесные почвы > серопески. Легкий гранулометрический состав серопесков и кислая реакция среды бурых лесных почв, а также низкое содержание в этих почвах органического вещества способствуют высокой подвижности, а, следовательно, и высокой экотоксичности меди в этих почвах.

Наночастицы CuO в меньшей степени повлияли на биологическое состояние чернозема обыкновенного, чем наночастицы Cu.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (№ 0852-2020-0029) и Президента Российской Федерации (НШ-2511.2020.11).

The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task in the field of scientific activity (no. 0852-2020-0029) and the President of the Russian Federation (NSH-2511.2020.11).

Литература

1. Bondarenko O., Juganson K., Ivask A., Kasemets K., Mortimer M., Kahru A. Toxicity of Ag, CuO and ZnO nanoparticles to selected environmentally relevant test organisms and mammalian cells in vitro: a critical review. *Arch. Toxicol.* 2013. Vol. 87. P. 1181–1200.
2. 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. № 8. С. 986–992.
3. Zhao S., Su X., Wang Y., Yang X., Bi M., He Q., Chen Y. Copper Oxide Nanoparticles Inhibited Denitrifying Enzymes and Electron Transport System Activities to Influence Soil Denitrification and N₂O Emission. *Chemosphere*. 2020. № 245. P. 125394. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125394.
4. Ingle A.P., Duran N., Rai M. Bioactivity, mechanism of action, and cytotoxicity of copper-based nanoparticles: a review. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2014. No. 98. P. 1001–1009.
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. No. 18. P. 13710–13723.
6. Tanha E.Y., Fallah S., Rostamnejadi A., Lok P. Particle size and concentration dependent toxicity of copper oxide nanoparticles (CuONPs) on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. Kowsar). *Science of The Total Environment*. 2020. No. 9. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136994.
7. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. V. 191. No. 9. Article number 544.
8. Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.S., Akimenko Y.V., Soldatov A.V. Comparison of ecotoxicity of nickel and iron oxides and their nanoforms. *Rasayan Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 12. No. 2. P. 549–553. DOI: 10.31788/RJC.2019.1225058.
9. Колесников С.И., Тлехас З.Р., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Изменение биологических свойств почв Адыгеи при химическом загрязнении. *Почвоведение*. 2009. № 12. С. 1499–1505.
10. Jin L., Son Y., DeForest J.L., Kang Y.J., Kim W., Chung H. Single-walled carbon nanotubes alter soil microbial community composition. *Sci. Total Environ.* 2014. Vol. 466. P. 533–538.
11. Dimkpa C.O., McLean J.E., Britt D.W., Johnson W.P., Arey B., Lea A.S., Anderson A.J. Nanospecific inhibition of pyoverdine siderophore production in *Pseudomonas chlororaphis* O6 by CuO nanoparticles. *Chem. Res. Toxicol.* 2012. Vol. 25. No. 5. P. 1066–1074.
12. Li X., Yang Y., Jia L., Chen H., Wei X. Zinc-induced oxidative damage, antioxidant enzyme response and proline metabolism in roots and leaves of wheat plants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2013. No. 89. P. 150–157.
13. Levard C., Hotze E.M., Lowry G.V., Brown G.E., Jr. Environmental transformations of silver nanoparticles: impact on stability and toxicity. *Environ Sci Technol.* 2012. Vol. 46. No. 13. P. 6900–6914.
14. Yadav G., Shrivastava P.K., Singh V.P., Prasad S.M. The intensity of light changes the degree of arsenic toxicity in seedlings *Helianthus annuus* L. *Biological Trace Element Research*. 2014. No. 158. P. 410–421.

References

1. Bondarenko O., Juganson K., Ivask A., Kasemets K., Mortimer M., Kahru A. Toxicity of Ag, CuO and ZnO nanoparticles to selected environmentally relevant test organisms and mammalian cells in vitro: a critical review. *Arch. Toxicol.* 2013. Vol. 87. P. 1181–1200.
2. Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V., Miasnikova M.A. Otsenka ekotoksichnosti nanochastits medii, nikelya i tsinka po biologicheskimi pokazatelyam chernozema. *Pochvovedenie*. 2019. № 8. S. 986–992.
3. Zhao S., Su X., Wang Y., Yang X., Bi M., He Q., Chen Y. Copper Oxide Nanoparticles Inhibited Denitrifying Enzymes and Electron Transport System Activities to Influence Soil Denitrification and N₂O Emission. *Chemosphere*. 2020. № 245. P. 125394. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125394.
4. Ingle A.P., Duran N., Rai M. Bioactivity, mechanism of action, and cytotoxicity of copper-based nanoparticles: a review. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2014. No. 98. P. 1001–1009.
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. No. 18. P. 13710–13723.
6. Tanha E.Y., Fallah S., Rostamnejadi A., Lok P. Particle size and concentration dependent toxicity of copper oxide nanoparticles (CuONPs) on seed yield and antioxidant defense system in soil grown soybean (*Glycine max* cv. Kowsar). *Science of The Total Environment*. 2020. No. 9. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136994.
7. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. V. 191. No. 9. Article number 544.
8. Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.S., Akimenko Y.V., Soldatov A.V. Comparison of ecotoxicity of nickel and iron oxides and their nanoforms. *Rasayan Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 12. No. 2. P. 549–553. DOI: 10.31788/RJC.2019.1225058.
9. Kolesnikov S.I., Tlekhas Z.R., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Izmenenie biologicheskikh svoystv pochv Adygei pri khimicheskoi zagryaznenii. *Pochvovedenie*. 2009. № 12. S. 1499–1505.
10. Jin L., Son Y., DeForest J.L., Kang Y.J., Kim W., Chung H. Single-walled carbon nanotubes alter soil microbial community composition. *Sci. Total Environ.* 2014. Vol. 466. P. 533–538.
11. Dimkpa C.O., McLean J.E., Britt D.W., Johnson W.P., Arey B., Lea A.S., Anderson A.J. Nanospecific inhibition of pyoverdine siderophore production in *Pseudomonas chlororaphis* O6 by CuO nanoparticles. *Chem. Res. Toxicol.* 2012. Vol. 25. No. 5. P. 1066–1074.
12. Li X., Yang Y., Jia L., Chen H., Wei X. Zinc-induced oxidative damage, antioxidant enzyme response and proline metabolism in roots and leaves of wheat plants. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2013. No. 89. P. 150–157.
13. Levard C., Hotze E.M., Lowry G.V., Brown G.E., Jr. Environmental transformations of silver nanoparticles: impact on stability and toxicity. *Environ Sci Technol.* 2012. Vol. 46. No. 13. P. 6900–6914.
14. Yadav G., Shrivastava P.K., Singh V.P., Prasad S.M. The intensity of light changes the degree of arsenic toxicity in seedlings *Helianthus annuus* L. *Biological Trace Element Research*. 2014. No. 158. P. 410–421.

А.Н. Тимошенко – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник, Академия биологии и биотехнологий Южного федерального университета (Академия биологии и биотехнологий ЮФУ), e-mail: aly9215@mail.ru • С.И. Колесников – д-р с.-х. наук, профессор, Академия биологии и биотехнологий ЮФУ, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru • В.М. Вардун – аспирант, Академия биологии и биотехнологий ЮФУ, e-mail: vardunivladimir@gmail.com • Т.А. Тер-Мисакянц – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник, Академия биологии и биотехнологий ЮФУ, e-mail: rak@bk.ru • Е.Н. Неведомая – канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник, Академия биологии и биотехнологий ЮФУ, e-mail: mj20@rambler.ru • К.Ш. Казеев – д-р геогр. наук, профессор, Академия биологии и биотехнологий ЮФУ, e-mail: kamil_kazeev@mail.ru

A.N. Timoshenko – Cand. Sci. (Biol.), Senior Research Fellow, Academy of Biology and Biotechnology D.I. Ivanovsky Southern Federal University, (Academy of Biology and Biotechnology SFU), e-mail: aly9215@mail.ru • S.I. Kolesnikov – Academy of Biology and Biotechnology SFU, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru • V.M. Varduni – Post-graduate Student, Academy of Biology and Biotechnology SFU, e-mail: vardunivladimir@gmail.com • T.A. Ter-Misakants – Cand. Sci. (Biol.), Senior Research Fellow, Academy of Biology and Biotechnology SFU, e-mail: rak@bk.ru • E.N. Nevedomaya – Cand. Sci. (Biol.), Senior Research Fellow, Academy of Biology and Biotechnology SFU, e-mail: mj20@rambler.ru • K.Sh. Kazeev – Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Academy of Biology and Biotechnology SFU, e-mail: kamil_kazeev@mail.ru