

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4:657.044

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ НАНОЧАСТИЦАМИ ПЛАТИНЫ МЕТОДАМИ БИОДИАГНОСТИКИ

© 2023 г. А. Н. Тимошенко^а, *, С. И. Колесников^а, В. С. Кабакова^а, Н. А. Евстегнеева^а,
Т. В. Минникова^а, К. Ш. Казеев^а, Т. М. Минкина^а

^аЮжный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Иванковского,
пр-т Стачки, 194/1, Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*e-mail: aly9215@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2023 г.

После доработки 06.04.2023 г.

Принята к публикации 07.04.2023 г.

Дана оценка устойчивости почв юга России, различающихся по гранулометрическому составу, содержанию органического вещества и реакции среды к загрязнению наночастицами платины (PtНЧ) по биологическим показателям. Провели лабораторные модельные исследования устойчивости к загрязнению PtНЧ образцов почв из слоя 0–10 см, контрастных по генетическим характеристикам: чернозема обыкновенного (Haplic Chernozem (Loamic)), бурой лесной (Eutric Cambisol) и серопесков (Eutric Arenosol). Исследовали концентрации PtНЧ 0.01, 0.1, 1, 10 и 100 мг/кг. Устойчивость почв оценивали по наиболее чувствительным и информативным биологическим показателям состояния почвы: общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназ, всхожести и изменению длины корней редиса. Установили, что низкие концентрации PtНЧ 0.01, 0.1 и 1 мг/кг в большинстве случаев не оказывают достоверного влияния на биологическое состояние почв, а большие дозы 10 и 100 мг/кг приводят к снижению биологических показателей. Ферментативная активность почв при загрязнении PtНЧ была снижалась в меньшей степени, чем фитотоксические и микробиологические показатели. Чернозем обыкновенный проявил большую устойчивость к загрязнению PtНЧ, чем бурая лесная почва и серопески. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования экологических рисков при загрязнении почв PtНЧ и разработки предельно допустимых концентраций платины в различных почвах.

Ключевые слова: экотоксичность, тяжелые металлы, биотестирование, биологические свойства

DOI: 10.31857/S0032180X23600221, **EDN:** OJCCTO

ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнологии достигли огромного прогресса за последние десятилетия и продолжают активно развиваться. Согласно “The Global Nanotechnology Market 2021–2026” [67] мировой рынок нанотехнологий должен вырасти от 5.2 млрд \$ в 2021 г. до 23.6 млрд \$ к 2026 г. при совокупном годовом темпе роста 35.5% в период 2021–2026 гг. Одним из основных факторов, стимулирующих рост рынка нанотехнологий, является растущее их применение в различных секторах. В настоящее время число отраслей, которые широко используют наночастицы платины (PtНЧ), постоянно растет, что приводит к повышенным концентрациям этого редкого металла в объектах окружающей среды [29]. Платина известна способностью катализировать процессы окисления, гидрогенизации и дегидрогенизации в биосистемах (благодаря большой площади поверхности), что имеет решающее значение для многих промышленных процессов [31], и обладает специфическими свой-

ствами такими, как большая площадь поверхности и хорошая устойчивость к коррозии и химическим воздействиям [60]. Наиболее важной областью применения Pt, преимущественно в форме наночастиц, является автомобильная промышленность. Из-за уникальной каталитической активности PtНЧ являются наиболее часто используемыми каталитическими металлами в автомобильных нейтрализаторах [58, 63]. Автомобильные катализаторы стали основным источником антропогенного загрязнения окружающей среды Pt в большей степени в форме наночастиц [69]. Во время эксплуатации транспортных средств PtНЧ поступают в придорожную пыль, почвы и растения [25, 34]. PtНЧ широко используются не только в промышленности в качестве катализаторов [19, 35, 45] и в реакциях гидрирования [65, 71], но прежде всего, в медицине и диагностике [22, 32, 58]. Наночастицы платины зарекомендовали себя в качестве эффективных антимикробных и противоопухолевых агентов [37]. Кроме того, PtНЧ применяют-

ся для получения солнечной энергии [39], удаления сильно загрязняющих окружающую среду ароматических соединений [41] и очистки воды от фармацевтических продуктов [46, 49].

Естественными источниками платиноидов на поверхности Земли являются вулканизм, выветривание горных пород и отложение внеземного вещества [51]. Учитывая, что концентрации обоих веществ в континентальной коре низкие, а естественные источники обеспечивают ограниченное количество платиноидов на поверхности Земли, судьба этих элементов в окружающей среде не должна вызывать особого беспокойства. Однако антропогенные выбросы элементов платиновой группы начались в начале индустриального периода, примерно в 1750-х гг. Именно с этого времени наблюдается накопление этих элементов в некоторых почвах [16].

Повышенное содержание платины в почвах, подверженных антропогенному влиянию по сравнению с незатронутыми почвами, отмечается в проведенных ранее исследованиях. Так, фоновое содержание платины в почвах Германии без антропогенного влияния составляет 0.00014 мг/кг, сельскохозяйственных почвах — 0.0011 мг/кг; почвах возле дорог — 0.0209 мг/кг [16]. В работе [56] отмечается более высокое содержание Pt в городских почвах (от 0.06 до 1.58 мг/кг в зависимости от района) по сравнению с почвами в сельских районах (0.003 мг/кг). Максимальная концентрация Pt была зафиксирована в районе Палермо, в непосредственной близости от исторического центра города, характеризующемся узкими улицами, интенсивным движением, состоящим из автомобилей и автобусов, — 2.24 мг/кг. В почвах Берлина значения содержания Pt в пригородных районах составили 0.00298 и 0.00583 мг/кг для сельскохозяйственных и лесных почв соответственно [21]. В верхнем слое городских почв в Европе содержание Pt колеблется от 0.00046 до 0.164 мг/кг [21]. Определено содержание пяти элементов платиновой группы Pt в почвах и уличной пыли Юго-Восточного административного округа г. Москвы, территории, подверженной повышенному риску загрязнения. В почве содержание Pt составляло 0.09 мг/кг, в уличной пыли — 0.16 мг/кг [9].

По данным [54], автокатализаторы выбрасывают преимущественно нанокристаллическую платину Pt⁰, причем определенная доля элемента в этих частицах присутствует в химически растворимых формах. В работах [30, 52] отмечается, что частицы платины в выхлопных газах присутствуют в основном как Pt⁰ и (очень мало) в виде Pt⁴⁺. Многие исследователи отмечают, что наночастицы платины способны подвергаться химической и биохимической трансформации в окружающей среде и формировать растворимые соединения [36, 50]. Таким образом, часть PtНЧ поступает в

почву уже в виде Pt⁴⁺, а часть Pt⁰ переходит в Pt⁴⁺ в процессе химической и биохимической трансформации.

Механизм токсического действия наночастиц Pt⁰ пока не установлен (в литературе не встречается). Относительно механизма токсичности Pt⁴⁺, установлено, что ионы платины способны связываться с сульфгидрильными группами [20], это характерно для многих тяжелых металлов.

На сегодняшний день лишь в немногих исследованиях в области нанотоксикологии рассматривалось воздействие PtНЧ на различные организмы и окружающую среду. Известно, что PtНЧ подавляют деление клеток микроорганизмов, снижая их биологическую активность. Наночастицы платины связываются с бактериальной клеткой и влияют на функциональность клеточной мембраны, что приводит к гибели клетки [24, 48, 62, 63]. Установлено, что концентрация PtНЧ 2.5 мг/кг вызывает уменьшение общей численности бактерий во всех почвенных горизонтах, угнетение азотфиксации и нитрификации в гумусово-аккумулятивных горизонтах [47]. Антибактериальная активность зависит от размера и формы наночастиц. Большинство исследований бактерицидных эффектов PtНЧ сосредоточено на комбинации платины с другими бактерицидными компонентами [33].

Установлено, что платина в низких концентрациях может оказывать как стимулирующий, так и токсический эффект на ферментативную активность почв, в зависимости от исследуемого фермента [63]. Работ по влиянию наночастиц платины на ферментативную активность почвы не отмечено.

Зафиксировано негативное влияние PtНЧ на рост растений [43, 57] и способность PtНЧ накапливаться в тканях растений [18, 61]. В работе [43] изучено влияние платины в различных формах и концентрациях на прорастание и рост корней растений овса (*Avena sativa* L.), кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и томата (*Lycopersi-conesculentum* Mill.). Токсичность платиносодержащих соединений для роста корней молодых саженцев зависела от дозы и вида тестируемых растений. Доза платины 1 мг/кг оказала стимулирующий эффект на рост длины корней кресс-салата [43].

Попадая в почву, наночастицы могут поступать в живые организмы через пищевую цепь [27, 72]. Почва является чувствительным компонентом окружающей среды, а ее биологические компоненты первыми реагируют на загрязнение [4].

Цель исследования — оценить устойчивость почв, различающихся по гранулометрическому составу, содержанию органического вещества и реакции среды, на загрязнение наночастицами платины по биологическим показателям.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика объектов исследования. Для оценки воздействия исследовали три типа почв: чернозем обыкновенный южно-европейской фации (Россия, г. Ростов-на-Дону, Ботанический сад ЮФУ) — *Naptic Chernozem (Loamic)* [70], серопески (Ростовская область, Усть-Донецкий район, ст. Верхнекундрюченская) — *Eutric Arenosol* [70] и бурую лесную слабонасыщенную (Республика Адыгея, Майкопский район, п. Никель) — *Eutric Cambisol* [70]. Для исследования воздействия PtНЧ выбрали верхний горизонт 0–10 см.

Выбор обусловлен разной устойчивостью этих типов почв к загрязнению тяжелыми металлами вследствие различий их генетических свойств, таких как гранулометрический состав, pH и содержание гумуса, определяющих подвижность в почве тяжелых металлов [38].

Использованные в исследовании черноземы обыкновенные характеризуются тяжелосуглинистым гранулометрическим составом (физическая глина (<0.01 мм) 50.9%), нейтральной реакцией среды — pH_{H_2O} 7.8, содержанием гумуса 2.7%; бурые лесные слабонасыщенные — тяжелосуглинистым гранулометрическим составом (физическая глина (<0.01 мм) 45.1%), кислой реакцией среды — pH_{H_2O} 5.8, содержанием гумуса 2.8%; серопески — легкосуглинистым гранулометрическим составом (физическая глина (<0.01 мм) 12.1%), нейтральной реакцией среды — pH_{H_2O} 6.8, содержанием гумуса 1.6%. Все почвы характеризуются средним обогащением как микроорганизмами, так и ферментами. Однако биологическая активность в черноземе обыкновенном значительно выше, чем в бурой лесной почве и серопесках. Общая численность бактерий составила в черноземе обыкновенном 5 млрд/г, в бурой лесной почве — 2.4 млрд/г, в серопесках — 2.6 млрд/г; активность каталазы в черноземе обыкновенном — 8.7 мл O_2 /(г мин), в бурой лесной почве — 7 мл O_2 /(г мин), в серопесках — 4.2 мл O_2 /(г мин); активность дегидрогеназ — в черноземе обыкновенном — 22 мг ТТФ (2,3,5-трифенилтетразолий хлористый)/(10 г сут), в бурой лесной почве — 15.6 мг ТТФ/(10 г сут), в серопесках — 11 мг ТТФ/(10 г сут). Данные значения типичны для исследованных почв [3].

Почву после пробоотбора высушили, очищали от растительных остатков, перетирали и просеивали через сито с отверстиями, диаметром 3 мм. Для анализа использовали 300 г почвы, размещенной в пластиковые контейнеры объемом 500 мл. После этого вносили загрязняющее вещество. Модельный опыт закладывали в двух повторностях.

Характеристика используемых наночастиц. Наночастицы были предоставлены компанией

Guangzhou Hongwu Material Technology Co., Ltd. Для исследования устойчивости почв к загрязнению PtНЧ использовали наночастицы сферической формы (порошок) размером 20–30 нм, чистотой 99.99%. Данные характеристики заявлены производителем.

Методика лабораторного моделирования. В почвы вносили следующие концентрации PtНЧ: 0.01, 0.1, 1, 10 и 100 мг/кг. Несмотря на то, что концентрации наночастиц платины 1, 10, 100 мг/кг почвы не являются экологически значимыми, в связи с увеличением применения наночастиц платины в разных отраслях, уже совсем скоро они могут стать актуальными. Ранее установлено содержание платины в почве более 2 мг/кг, что превышает естественное фоновое содержание в 750 раз [21].

Наночастицы вносили сначала в небольшое количество почвы (10 г), тщательно перетирали, а затем смешивали с основной массой, которая составляла 300 г, и тщательно перемешивали. Почву инкубировали в вегетационных сосудах в контролируемых условиях: комнатной температуре (20–22°C), влажность поддерживали на уровне 25%. Через 10 сут после загрязнения определяли состояние почвы по следующим биологическим показателям: общая численность бактерий, активность каталазы и дегидрогеназ, всхожесть и длина корней редиса (*Raphanus sativus* L.).

Методы исследования. Реакцию почвенного бактериального сообщества почв на PtНЧ определяли по показателю общей численности бактерий (методом люминесцентной микроскопии) [3].

В качестве показателей фитотоксичности использовали всхожесть и длину корней. Одним из рекомендованных OECD [55] тест-объектов для оценки токсичности веществ в почве по изменению всхожести семян и длины наземных побегов является редис. Семена редиса имеют небольшой размер, малый запас питательных веществ, поэтому редис является хорошим индикатором загрязнения, а относительно короткий вегетационный период позволяет использовать его для лабораторных опытов [3]. Использовали семена редиса сорта “18 дней”. Посев осуществляли после извлечения почвы из инкубационных сосудов. Для оценки фитотоксичности из каждого вегетационного сосуда через 10 сут после загрязнения отбирали по 40 г почвы в 3-кратной повторности. Навеску почвы помещали в чашки Петри, увлажняли до 80% полной влагоемкости и перемешивали до однородной консистенции. В подготовленную таким образом почву высаживали по 20 семян редиса. Исследуемые образцы находились в условиях постоянной оптимальной температуры, влажности и освещения в климатической камере KBW240. Продолжительность эксперимента составляла 7 сут.

Скорость биохимических превращений, происходящих в почве, оценивали по активности почвенных ферментов [5]. Изучали активности ферментов класса оксидоредуктаз: каталазы и дегидрогеназ. Активность каталазы определяли газометрическим методом по скорости разложения 3%-ной H_2O_2 после контакта с почвой (температура, 20–22°C), активность дегидрогеназ — спектрофотометрически на спектрофотометре PE 5800VI при длине волны 540 нм [3].

На основе наиболее чувствительных и информативных биологических показателей определяли интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы [4]. Для расчета ИПБС почвы использовали общую численность бактерий, активность каталазы и дегидрогеназ, всхожесть и длину корней семян редиса.

Для расчета ИПБС в выборке максимальное значение каждого из показателей принимали за 100%, и по отношению к нему в процентах выражали значение показателя в остальных образцах:

$$B_1 = \frac{B_x}{B_{\max}} \times 100\%, \quad (1)$$

где B_1 — относительный балл показателя; B_x — фактическое значение показателя; $B_{\max}$ — максимальное значение показателя. После этого рассчитывали средний оценочный балл изученных показателей для образца (варианта), абсолютные значения которых не могут быть суммированы, так как имеют разные единицы измерения (мг, мм, %). Интегральный показатель биологического состояния почвы рассчитывали аналогично формуле:

$$\text{ИПБС} = \frac{B_{\text{ср}}}{B_{\text{ср. max}}} \times 100\%, \quad (2)$$

где $B_{\text{ср}}$ — средний оценочный балл всех показателей, $B_{\text{ср. max}}$ — максимальный оценочный балл всех показателей.

Используемая методология позволяет интегрировать относительные значения различных показателей, которые имеют различные единицы измерения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента представлены в табл. 1. Загрязнение РтНЧ чернозема обыкновенного, бурой лесной почвы и серопесков привело к изменению в различной степени общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназ, всхожести и длины корней семян редиса в зависимости от концентрации загрязняющего вещества и типа почвы. В низких концентрациях (0.01, 0.1 и 1 мг/кг) РтНЧ либо не оказывали достоверного уменьшения значений показателей, либо вызывали стимулирование показателей на

1–8%. При загрязнении большими концентрациями (10 и 100 мг/кг) установлено ингибирование всех исследованных биологических показателей. Наибольший токсический эффект РтНЧ зафиксирован при наибольшей концентрации (100 мг/кг) — от 22 до 61% в зависимости от показателя и типа почвы. Степень токсичности РтНЧ определялась свойствами почвы, которые влияют на концентрацию подвижных форм РтНЧ. Наиболее устойчивым к загрязнению РтНЧ оказался чернозем обыкновенный. Это объясняется тем, что тяжелый гранулометрический состав, нейтральная реакция среды (рН 7.8) и большее по сравнению с другими почвами содержание гумуса (3.7%) обуславливают низкую подвижность загрязняющего вещества в черноземе обыкновенном, а легкий гранулометрический состав серопесков и кислая реакция среды бурых лесных почв (рН 5.8), а также низкое содержание органического вещества в этих почвах способствуют большей подвижности [38], а следовательно и высокой экотоксичности РтНЧ. Зависимость уровня уменьшения показателей от подвижности токсиканта в почве и устойчивость сильногумусированных почв по сравнению с другими к тяжелым металлам, в том числе в форме наночастиц, отмечалась ранее [10–15].

Микробиологические показатели. Общая численность бактерий не изменялась при внесении малых доз (0.01, 0.1 и 1 мг/кг) РтНЧ. Более того, доза 1 мг/кг вызывала стимулирование данного показателя на всех исследованных почвах на 5–8%. Концентрации 10 и 100 мг/кг вызывали уменьшение общей численности бактерий на 6–30% в черноземе обыкновенном и от 12 до 42% в серопесках и бурой лесной почве. При этом наблюдалась закономерность: чем выше доза, тем сильнее уменьшение показателя. Кроме того, уровень снижения зависел от типа почвы. Серопески и бурая лесная почва примерно в равной степени менее устойчивы к загрязнению РтНЧ, чем чернозем обыкновенный.

Анализ литературных данных показал отсутствие информации о влиянии РтНЧ на почвенные бактерии. Имеются исследования, свидетельствующие о токсичности РтНЧ в отношении патогенных для животных и человека микроорганизмов [20, 23, 44]. Существует ряд исследований, свидетельствующих о значительном сокращении общей численности бактерий при загрязнении почв наночастицами других металлов: серебра [8, 35, 42], меди [18], цинка [17, 40, 42, 66].

Ферментативная активность. Поступление РтНЧ в концентрациях 10 и 100 мг/кг привело к снижению активности каталазы во всех почвах. Меньшие дозы (0.01, 0.1 и 1 мг/кг) либо вызывали недостоверное стимулирование показателя (для чернозема обыкновенного), либо статистически недостоверное уменьшение (для бурой лесной

Таблица 1. Влияние загрязнения РтНЧ на биологические свойства почв

Почва	Содержание металла в почве, мг/кг						НСР _{0.05}
	контроль	0.01	0.1	1	10	100	
Общая численность бактерий, млрд/г							
Чернозем обыкновенный	5	5	5	5.3	4.7	3.5	0.5
Серопески	2.6	2.4	2.5	2.8	2.3	1.5	0.2
Бурая лесная почва	2.4	2.4	2.4	2.6	2	1.4	0.2
НСР _{0.05}		0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	
Активность каталазы, мл О ₂ /(г почвы мин)							
Чернозем обыкновенный	8.7	8.7	8.7	9.0	8.5	7.0	0.9
Серопески	4.2	4.1	3.9	3.8	3.9	3.2	0.4
Бурая лесная почва	7.0	6.8	6.6	6.7	6.6	5.6	0.7
НСР _{0.05}		0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	
Активность дегидрогеназ, мг ТТФ (2,3,5-трифенилтетразолий хлористый)/(10 г почвы 24 ч)							
Чернозем обыкновенный	22.1	22.3	22.1	22.5	23.8	17	2.3
Серопески	11	11	10.6	11	11.3	8.3	1.1
Бурая лесная почва	15.6	15.3	15.1	15.1	15.8	11.3	1.6
НСР _{0.05}		1.0	1.0	1.0	1.1	0.8	
Всхожесть редиса, % от контроля							
Чернозем обыкновенный	100	100	96	100	86	64	7
Серопески	100	98	96	100	78	48	7
Бурая лесная почва	100	96	100	100	84	60	7
НСР _{0.05}		4.9	4.8	5.0	4.1	2.8	
Длина корней редиса, % от контроля							
Чернозем обыкновенный	100	100	100	113	84	59	8
Серопески	100	97	98	110	76	39	7
Бурая лесная почва	100	98	104	107	79	55	7
НСР _{0.05}		6.3	6.5	7.1	5.1	3.3	
Интегральный показатель биологического состояния почвы, %							
Чернозем обыкновенный	100	100	99	105	94	70	
Серопески	100	97	96	101	87	59	
Бурая лесная почва	100	98	99	102	88	65	

почвы). Активность каталазы и дегидрогеназ серопесков оказались чувствительна (ингибировалась) ко всем концентрациям, за исключением 1 мг/кг, где уменьшения не наблюдали. Активность дегидрогеназ на всех исследованных почвах снизилась только при максимальной концентрации РтНЧ 100 мг/кг на 23–28%. В черноземе обыкновенном при внесении 10 мг/кг РтНЧ установлена стимуляция активности дегидрогеназ на 8%. В серопесках и бурой лесной почве все исследованные концентрации, за исключением максимальной 100 мг/кг, не вызывали изменений. Влияние аналогичных концентраций наночастиц Ag (1, 10 и 100 мг/кг) на активность ферментов в почве исследовано ранее [42]. При этом для наночастиц Ag уменьшение данного показателя зафик-

сировано для всех исследованных доз, что не характерно для РтНЧ, где малые дозы не оказывают статистически значимого влияния на активность почвенных ферментов. Исследований по влиянию РтНЧ на активность почвенных ферментов не обнаружено. Работы по влиянию наночастиц других металлов: Ag [42], Zn [2, 73], Ti [73], Ce [73], Cu [6] и Ni [6] – на ферментативную активность почвы подтверждают отрицательное воздействие наночастиц на данный показатель. Степень уменьшения показателей, как и в настоящем исследовании, зависела не только от концентрации загрязняющего вещества, но и от типа почвы. При загрязнении РтНЧ активность ферментов в наименьшей степени снижалась в черноземе обыкновенном. Наибольшее уменьшение активности

каталазы наблюдали в серопесках — на 8–24% от контроля, активности дегидрогеназ в бурой лесной почве — на 2–28% от контроля.

Фитотоксические показатели. Установлено, что концентрации 0.01 и 0.1 мг/кг РтНЧ не оказывают влияния на всхожесть и длину корней редиса во всех исследованных почвах. При внесении в почву 1 мг/кг РтНЧ всхожесть редиса не отличалась от контроля, а длина корней редиса увеличилась на 7–13% по сравнению с контрольными значениями. Большие концентрации РтНЧ (10 и 100 мг/кг) вызывают подавление всхожести (от 14 до 52%) и уменьшение длины корней редиса (от 16 до 61%). Степень отрицательного воздействия зависела от концентрации загрязняющего вещества и типа почвы. Наибольшее уменьшение фитотоксических показателей наблюдали в серопесках, а наименьшее — в черноземе обыкновенном. Негативное влияние РтНЧ на рост и урожайность растений отмечали и другие исследователи. Так, зафиксировано уменьшение всхожести гороха посевного (*Pisum sativum* L.) на 45% за 3 ч обработки семян. Урожайность была увеличена на 126%, но средняя масса семян сократилась на 68% [57]. Однако имеются исследования, в которых негативное влияние платины, в том числе в форме наночастиц, не зафиксировано [1, 64].

Фитотоксические и микробиологические показатели проявили себя более чувствительными (значения уменьшались от контроля в большей степени), чем показатели ферментативной активности почв.

Интегральный показатель состояния почв. По результатам расчета ИПБС установлено, что наибольшее влияние РтНЧ оказывают в серопесках, а наименьшее — в черноземе обыкновенном. Возможно, это объясняется большей подвижностью вещества, а следовательно и большей экотоксичностью в почвах с легким гранулометрическим составом, низким содержанием гумуса и кислой реакцией среды [10, 11]. По литературным данным, важную роль в подвижности наночастиц в почве играют гранулометрический состав, содержание органического углерода и кислотность [7, 26, 28]. Тяжелый гранулометрический состав, высокое содержание гумуса снижают подвижность наночастиц в почвах, а большее содержание песка и низкие значения pH увеличивают подвижность наночастиц [26, 59]. При этом pH почвы рассматривается как один из критических факторов, определяющих поведение наночастиц в почве [26, 59]. В кислых условиях наночастицы становятся источниками ионов [53, 68].

Небольшие концентрации РтНЧ в почве (0.01, 0.1 и 1 мг) не вызывают ухудшения биологического состояния почв, в отличие от концентраций 10 и 100 мг/кг. Максимальное снижение ИПБС отмечается для наибольшей дозы (100 мг/кг) — на

30, 41 и 35% для чернозема обыкновенного, серопесков и бурой лесной почвы соответственно.

В настоящем исследовании в большинстве случаев зафиксировано стимулирующее действие РтНЧ на биологические свойства чернозема в концентрации 1 мг/кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение чернозема обыкновенного, бурой лесной почвы, серопесков РтНЧ в концентрациях 10 и 100 мг/кг привело к уменьшению общей численности бактерий, всхожести и длины корней проростков редиса, активности каталазы и дегидрогеназ. Низкие концентрации РтНЧ (0.01, 0.1 мг/кг) не оказывают влияния на биологическое состояние почв, концентрация 1 мг/кг вызывает стимулирование показателей, в отдельных случаях статистически недостоверное, а большие дозы (10 и 100 мг/кг) приводят к снижению биологических показателей, что подтверждает необходимость проведения дальнейших исследований о возможных негативных последствиях, связанных с поступлением РтНЧ в почву.

Чернозем обыкновенный проявил большую устойчивость к загрязнению РтНЧ, чем бурая лесная почва и серопески.

Ингибирование активности ферментов исследованных почв наблюдали при больших дозах РтНЧ, чем для фитотоксических и микробиологических показателей.

Полученные результаты будут полезны для прогнозирования экологических рисков при загрязнении почв РтНЧ и разработке предельно допустимых концентраций платины в различных почвах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-74-00080, <https://rscf.ru/project/22-74-00080/>.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что конфликт интересов отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буренина А.А., Воронова А.О., Астафурова Т.П. Морфофизиологические эффекты при воздействии наночастиц платины на проростки пшеницы // Сб. науч. тр. по материалам научной конференции, посвященной 100-летию кафедры физиологии растений и микроорганизмов Пермского гос. национ. исслед. ун-та. 18–19 октября 2017 г. Пермь, 2017. С. 9–11.

2. Галактионова Л.В., Губайдуллина И.З., Лебедев С.В., Гавриш И.А. Воздействие наночастиц цинка на морфометрические показатели и пигментный аппарат *Raphanus sativus* L., *Lepidium sativum* L. и *Avena sativa* L. // Известия ОГАУ. 2017. № 2. С. 203–205.
3. Казеев К.Ш., Колесников С.И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного фед. ун-та, 2012. 260 с.
4. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические последствия загрязнения почв тяжелыми металлами. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 232 с.
5. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Татосян М.Л., Вальков В.Ф. Влияние загрязнения нефтью и нефтепродуктами на биологическое состояние чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2006. № 5. С. 616–620.
6. 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. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080094>
7. Кубракова И.В., Тютюнник О.А., Кощеева И.Я., Садагов А.Ю., Набиуллина С.Н. Миграционное поведение платиновых металлов в природно-техногенных системах // Геохимия. 2017. № 1. С. 68–85. <https://doi.org/10.7868/S0016752516120050>
8. Куликова Н.А. Наночастицы серебра в почве: поступление, трансформация, токсичность // Почвоведение. 2021. № 3. С. 304–319. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030096>
9. Ладонин Д.В. Элементы платиновой группы в почвах и уличной пыли Юго-Восточного административного округа г. Москвы // Почвоведение. 2018. № 3. С. 274–283. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18030024>
10. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г. Взаимодействие тяжелых металлов с органическим веществом чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2006. № 7. С. 804–811.
11. Плеханова И.О., Золотарева О.А., Тарасенко И.Д., Яковлев А.С. Оценка экотоксичности почв в условиях загрязнения тяжелыми металлами // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1243–1258. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100083>
12. Терехова В.А., Прудникова Е.В., Кирюшина А.П., Карпунин М.М., Плеханова И.О., Якименко О.С. Фитотоксичность тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности // Почвоведение. 2021. № 6. С. 757–768. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21060137>
13. Тимошенко А., Колесников С., Вардуни В., Тер-Микасянц Т., Неведомая Е., Казеев К. Оценка экотоксичности наночастиц меди // Экология и промышленность России. 2021. № 25. Р. 61–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-4-61-65>
14. Цепина Н.И., Минникова Т.В., Колесников С.И., Казеев К.Ш. Оценка фитотоксичности серебра на почвах разной устойчивости: бурых лесных, черноземах и серопесках // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2020. № 3. Р. 107–112. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2020-3-107-112>
15. Чернова О.В., Безуглова О.С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв // Почвоведение. 2019. № 8. С. 1015–1026. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080045>
16. Alt F., Eschnauer H.R., Mergler B., Messerschmidt J., Tölg G. A contribution to the ecology and enology of platinum // Fresenius J. Analyt. Chem. 1997. V. 357. Р. 1013–1019. <https://doi.org/10.1007/s002160050296>
17. Ameen K.I., Alabdullatif J.A., AL-Nadhari S. A review on metal-based nanoparticles and their toxicity to beneficial soil bacteria and fungi // Ecotoxicology Environ. Safety. 2021. V. 213. Р. 112027. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112027>
18. Asztemborska M., Steborowski R., Kowalska J., Bystrzejewska-Piotrowska G. Accumulation of aluminum by plants exposed to nano- and micro-sized particles of Al_2O_3 // Int. J. Environ. Res. 2015. V. 9. Р. 109–116. <https://doi.org/10.22059/ijer.2015.880>
19. Ayad M.M., Torad N.L., El-Nasr A.A., Amer W. Study on catalytic efficiency of platinum and silver nanoparticles confined in nanosized channels of a 3-D mesostructured silica // J. Porous Materials. 2021. V. 28. Р. 65–79. <https://doi.org/10.1007/s10934-020-00960-7>
20. Aygun A., Gülbagca F., Ozer L.Y., Ustaoglu B., Altunoglu Y.C., Baloglu M.C., Atalar M.N., Alma M.H., Sen F. Biogenic platinum nanoparticles using black cumin seed and their potential usage as antimicrobial and anticancer agent // J. Pharmaceutical Biomedical Analysis. 2020. V. 179. Р. 112961. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.112961>
21. Birke M., Rauch U., Stummeyer J., Lorenz H., Keilert B. A review of platinum group element (PGE) geochemistry and a study of the changes of PGE contents in the topsoil of Berlin, Germany, between 1992 and 2013 // J. Geochem. Exploration. 2018. V. 187. Р. 72–96. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.09.005>
22. Bloch K., Paredesi K., Satriano C., Ghosh S. Bacteriogenic Platinum Nanoparticles for Application in Nanomedicine // Frontiers Chem. 2021. V. 9. Р. 624344. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.624344>
23. Chlumsky O., Purkrtova S., Michova H., Sykorova H., Slepicka P., Fajstavr D., Ulbrich P., Viktorova J., Demnerova K. Antimicrobial properties of palladium and platinum nanoparticles: A new tool for combating food-borne pathogens // Int. J. Molecular Sci. 2021. V. 22. Р. 7892. <https://doi.org/10.3390/ijms22157892>
24. Chwalibog A., Sawosz E., Hotowy A., Szeliga J., Mitura S., Mitura K., Grodzik M., Orlowski P., Sokolowska A. Visualization of interaction between inorganic nanoparticles and bacteria or fungi // Int. J. Nanomedicine. 2010. V. 5. Р. 1085–1094. <https://doi.org/10.2147/IJN.S13532>
25. Cicchella D., Fedele L., De Vivo B., Albanese S., Lima A. Platinum group element distribution in the soils from urban areas of the Campania region (Italy) // Geochemistry Exploration Environment Analysis. 2008.

- V. 8. P. 31–40.
<https://doi.org/10.1144/1467-7873/07-149>
26. Cornelis G., Pang L.P., Doolette C., Kirby J.K., McLaughlin M.J. Transport of silver nanoparticles in saturated columns of natural soils // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 463. P. 120–130.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.089>
27. De la Rosa G., Garcia-Castaneda C., Vazquez-Nunez E., Alonso-Castro A.J., Basurto-Islas G., Mendoza A., Cruz-Jimenez G., Molina C. Physiological and biochemical response of plants to engineered NMs: Implications on future design // *Plant Physiol. Biochem.* 2017. V. 110. P. 226–235.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.014>
28. Dimkpa C.O. Soil properties influence the response of terrestrial plants to metallic nanoparticles exposure // *Curr. Opin. Environ. Sci. Health.* 2018. V. 6. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.06.007>
29. Diong H.T., Das R., Khezri B., Srivastava B., Wang X., Sikdar P.K., Webster R.D. Anthropogenic platinum group element (Pt, Pd, Rh) concentrations in PM10 and PM2.5 from Kolkata, India // *SpringerPlus.* 2016. V. 5. P. 1242.
<https://doi.org/10.1186/s40064-016-2854-5>
30. Ek K.H., Rauch S., Morrison G.M., Lindberg P. Environmental routes for platinum group elements to biological materials – a review // *Sci. Total Environ.* 2004. V. 334–335. P. 149–159.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.04.027>
31. Gopal J., Hasan N., Manikandan M., Wu H. Bacterial toxicity/compatibility of platinum nanospheres, nanocuboids and nanoflowers // *Scientific Reports.* 2013. V. 3. P. 1260.
<https://doi.org/10.1038/srep01260>
32. Grimaldi M., Dal Bo V., Ferrari B., Roda E., Luca F. De., Veneroni P., Barni S. et al. Long-term effects after treatment with platinum compounds, cisplatin and [Pt (O, O'-acac)(γ-acac)(DMS)]: autophagy activation in rat B50 neuroblastoma cells // *Toxicol Appl. Pharmacol.* 2019. V. 364. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.12.005>
33. Hasani A., Madhi M., Gholizadeh P., Shahbazi J., Ahangarzadeh Rezaee M., Zarrini, G., Kafil H. Metal nanoparticles and consequences on multi-drug resistant bacteria: reviving their role // *SN Appl. Sci.* 2019. V. 1. P. 360.
<https://doi.org/10.1007/s42452-019-0344-4>
34. Huang J., Cao C., Li R., Guan W. Effects of silver nanoparticles on soil ammonia-oxidizing microorganisms under temperatures of 25 and 5°C // *Pedosphere.* 2018. V. 28. P. 607–616.
35. Huff C., Biehler E., Quach, Q., Long J.M., Abdel-Fattah T.M. Synthesis of highly dispersive platinum nanoparticles and their application in a hydrogen generation reaction // *Colloids Surfaces A: Physicochem. Engineer. Aspects.* 2021. V. 610. P. 125734.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125734>
36. Jarvis K.E., Parry S.J., Piper J.M. Temporal and spatial studies of autocatalyst-derived platinum, rhodium, and palladium and selected vehicle-derived trace elements in the environment // *Environ. Sci. Technol.* 2001. V. 35. P. 1031–1036.
<https://doi.org/10.1021/es0001512>
37. Jeyaraj M., Gurunathan, S., Qasim M., Kang M.H., Kim J.H. A Comprehensive review on the synthesis, characterization, and biomedical application of platinum nanoparticles // *Nanomaterials.* 2019. V. 9. P. 1719.
<https://doi.org/10.3390/nano9121719>
38. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010. P. 548.
39. Kasem K.K. Role of Platinum in Photoelectrochemical Studies Related to Solar Energy Harvesting // *Platin. Met. Rev.* 2012. V. 56. P. 221–228.
<https://doi.org/10.1595/147106712X654178>
40. Khan S.A., Shahid. S., Ayaz A., Alkahtani J., Elshikh M.S., Riaz T. Phytomolecules-Coated NiO Nanoparticles Synthesis Using Abutilon indicum Leaf Extract: Antioxidant, Antibacterial, and Anticancer Activities // *Int. J. Nanomedicine.* 2021. V. 16. P. 1757b1773.
<https://doi.org/10.2147/IJN.S294012>
41. Kliewer C.J., Somorjai G.A. Structure effects on Pyridine hydrogenation over Pt(111) and Pt(100) studied with sum frequency generation vibrational spectroscopy // *Catalysis Lett.* 2010. V. 137. P. 118–122.
42. Kolesnikov S.I., Tsepina N.I., Minnikova T.V., Kazeev K.SH., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N., Minkina T.M., Mazarji M., Singh R.K., Rajput V.D. Influence of Silver Nanoparticles on the Biological Indicators of Haplic Chernozem // *Plants.* 2021. V. 10. P. 1022.
<https://doi.org/10.3390/plants10051022>
43. Kołton A., Czaja M.A. Influence of platinum ions on the germination and seedling root growth of different plant species // *Geology Geophys. Environ.* 2014. V. 40. P. 343–348.
<https://doi.org/10.7494/geol.2014.40.4.343>
44. Kumar P.V., Jelastin Kala S.M., Prakash K.S. Green synthesis derived Pt-nanoparticles using Xanthium strumarium leaf extract and their biological studies // *J. Environ. Chem. Engineer.* 2019. V. 7. P. 103146.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103146>
45. Labbé F., Asset T., Chatenet M., Ahmad Y., Guérin K., Metkemeijer R., Berthon-Fabry S. Activity and Durability of Platinum-Based Electrocatalysts with Tin Oxide-Coated Carbon Aerogel Materials as Catalyst Supports // *Electrocatalysis.* 2019. V. 10. P. 156–172.
<https://doi.org/10.1007/s12678-018-0505-z>
46. Li Y., Zhang K., Peng S., Lu G., Li J.S. Photocatalytic hydrogen generation in the presence of ethanolamines over Pt/ZnIn₂S₄ under visible light irradiation // *J. Molecular Catalysis A: Chem.* 2012. V. 363. P. 354–361.
<https://doi.org/10.1016/j.molcata.2012.07.011>
47. Lushchaeva I.V., Morgalev Y.N. Effect of Platinum Nanoparticles on Biological Activity of Humus-Accumulated Horizons // *Adv. Mater. Res. Trans Tech Publ.* 2015. V. 1085. P. 384–389.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1085.384>
48. Manikandana M., Wua H.-F., Hasana N. Cell population-based mass spectrometry using platinum nanodots for algal and fungal studies // *Biosensors Bioelectronics.* 2012. V. 35. P. 493–497.
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2012.03.020>
49. Martins M., Mourato C., Sanches S., Noronha J.P., Crespo M.B., Pereira I.A. Biogenic platinum and palladium nanoparticles as new catalysts for the removal of pharmaceutical compounds // *Water Research.*

2017. V. 108. P. 160–168.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.071>
50. Merget R., Rosner G. Evaluation of the health risk of platinum group metals emitted from automotive catalytic converters // *Sci. Total Environ.* 2001. V. 270. P. 165–173.
 51. Mitra A., Sen I. Anthrobiogeochemical Platinum, Palladium and Rhodium Cycles of Earth: Emerging Environmental Contamination // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2017. V. 216. P. 417–432.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.08.025>
 52. Moldovan M., Palacios M.A., Gómez M.M. Environmental risk of soluble and particulate platinum group elements released from gasoline and diesel engine catalytic converters // *Sci. Total Environ.* 2002. V. 296. P. 199–208.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00087-6)
 53. Molleman B., Hiemstra T. Time, pH, and size dependency of silver nanoparticle dissolution: the road to equilibrium // *Environ. Sci. Nano.* 2017. V. 4. P. 1314–1327.
 54. Nachtigall D., Kock H., Artelt S., Levsen K., Wünsch G., Rühle T., Schlögl R. Platinum solubility of a substance designed as a model for emissions of automobile catalytic converters // *Fresenius J. Anal. Chem.* 1996. V. 354. P. 742–746.
 55. OECD. Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Section 2. OECD Publishing. Paris. 2006. 21 p.
 56. Orecchio S., Amorello D. Platinum levels in urban soils from Palermo (Italy). Analytical method using voltammetry // *Microchem. J.* 2011. V. 99. P. 283–288.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.05.016>
 57. Rahman M.S., Chakraborty A., Mazumdar S., Nandi N.C., Bhuiyan M.N.I., Alauddin S.M., Khan I.A., Hossain M.J. Effects of poly(vinylpyrrolidone) protected platinum nanoparticles on seed germination and growth performance of *Pisum sativum* // *Nano-Structures Nano-Objects.* 2020. V. 21. P. 100408.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100408>
 58. Rajput V.D., Minkina T., Sushkova S., Tsitsuashvili V., Mandzhieva S., Gorovtsov A., Nevidomskaya D., Gromakova N. Effect of nanoparticles on crops and soil microbial communities // *J. Soils Sediments.* 2017. V. 18. P. 2179–2187
<https://doi.org/10.1007/s11368-017-1793-2>
 59. Reith F., Cornelis G. Effect of soil properties on gold- and platinum nanoparticle mobility // *Chemical Geology.* 2017. V. 466. P. 446–453.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.06.033>
 60. Şahin B., Aygün A., Gündüz H., Şahin K., Demir E., Akocak S. et al. Cytotoxic effects of platinum nanoparticles obtained from pomegranate extract by the green synthesis method on the MCF-7 cell line // *Colloids Surf. B Biointerfaces.* 2018. V. 163. P. 119–124.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.12.042>
 61. Savignan L., Faucher S., Chéry P., Lespes G. Platinum group elements contamination in soils: Review of the current state // *Ecotoxicol. Environ. Safe.* 2021. V. 222. P. 112459.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112459>
 62. Seckin H., Tiri R.N.E., Meydan I., Aygun A.M., Gunduz K., Sen F. An environmental approach for the photodegradation of toxic pollutants from wastewater using Pt–Pd nanoparticles: Antioxidant, antibacterial and lipid peroxidation inhibition applications // *Environ. Res.* 2022. V. 208. P. 112708.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112708>
 63. Shar S., Shahsavaria E., Reith F., Alghamdi O.A., Yamanib H.A., AlJudaibib A., Donnere E., Vasileiadis S., Ball A.S. Dose-related changes in respiration and enzymatic activities in soils amended with mobile platinum and gold // *Appl. Soil Ecol.* 2021. V. 157. P. 103727.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103727>
 64. Shiny P.J., Mukerjee A., Chandrasekaran N. Comparative assessment of the phytotoxicity of silver and platinum nanoparticles // *Proceedings of the international conference on advanced Nanomaterials and emerging engineering technologies.* Chennai: Sathyabama University. 2013. P. 391–393.
<https://doi.org/10.1109/ICANMEET.2013.6609327>
 65. Sodeno M., Kato S., Nanao H., Shirai M. Preparation and structural characterization of platinum nanosheets intercalated between graphite powder with high surface area // *Catalysis Today.* 2020. V. 375. P. 48–55.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.04.038>
 66. Soltanian S., Sheikhabahaei M., Mohamadi N., Pabarja A., Abadi M.F.S., Tahroudi M.H.M. Biosynthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Hertia intermedia* and Evaluation of its Cytotoxic and Antimicrobial Activities // *BioNano-Science.* 2021. V. 11. P. 245–255.
<https://doi.org/10.1007/s12668-020-00816-z>
 67. The “Global Nanotechnology Market 2021–2026” report has been added to Research and Markets.com’s offering. 2021.
<https://www.prnewswire.com/news-releases/global-nanotechnology-market-report-2021-2026-market-opportunities-with-increasing-use-of-nanotechnology-in-building-materials-301433710.html>
 68. Wang J., Gerlach J.D., Savage N., Cobb G.P. Necessity and approach to integrated nanomaterial legislation and governance // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 442. P. 56–62.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.073>
 69. Wang Y., Li X. Health risk of platinum group elements from automobile catalysts // *Procedia Engineering.* 2012. V. 45. P. 1004–1009.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.273>
 70. World Reference Base for Soil Resources 2014. Update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 3rd. Rome. FAO, 2015. ISBN 978-92-5-108370-3
 71. Xantini Z., Erasmus E. Platinum supported on nanosilica and fibrous nanosilica for hydrogenation reactions // *Polyhedron.* 2021. V. 193. P. 114769.
<https://doi.org/10.1016/j.poly.2020.114769>
 72. Yang Q.Q., Li Z.Y., Lu X.N., Duan Q.N., Huang L., Bi J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 42. P. 690–700.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.068>
 73. You T., Liu D., Chen J., Yang Z., Dou R., Gao X., Wang L. Effects of metal oxide nanoparticles on soil enzyme activities and bacterial communities in two different soil types // *J. Soils Sediments.* 2018. V. 18. P. 211–221.
<https://doi.org/10.1007/s11368-017-1716-2>

Assessment of Soil Resistance to Contamination by Platinum Nanoparticles by Biodiagnostic Methods

A. N. Timoshenko^{1, *}, S. I. Kolesnikov¹, V. S. Kabakova¹, N. A. Evstegneeva¹,
T. V. Minnikova¹, K. Sh. Kazeev¹, and T. M. Minkina¹

¹*Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

**e-mail: aly9215@mail.ru*

Soil contamination with platinum nanoparticles is reproduced at a rapid rate, primarily because of the operation of vehicles with platinum exhaust gas converters. Already present on the territory with a concentration of platinum in the soil of more than 2 mg/kg, which is the maximum background content of 750 times. At the same time, the environmental risks of the adverse impact of platinum nanoparticles on the soil are practically not studied. The purpose of this work is to assess the consequences of different buffering capacities of soils to contamination with platinum nanoparticles in terms of biological parameters. Laboratory studies of soil resistance to pollution with platinum nanoparticles (PtNP) in the South of Russia were carried out, and their genetic properties were compared: Ordinary Chernozem (Haplic Chernozem (Loamic)), Brown Forest Soil (Eutric Cambisol), and Gray Sands (Eutric Arenosol). PtHЧ concentration studies 0.01, 0.1, 1, 10 and 100 mg/kg. Soil stability is assessed by the most sensitive and informative biological indicators of the state. It was found that the low content of PtNP (0.01, 0.1 and 1 mg/kg) in most cases does not lead to following the analysis of the biological state of the soil, and higher concentrations (10 and 100 mg/kg) lead to biological indicators. Soil enzymatic activity under PtHЧ contamination was inhibited to a lesser extent than phytotoxic and microbiological indicators. Common chernozem caused greater penetration to PtNP contamination than brown forest soil and gray sands. The results obtained were used to predict environmental risks in case of pollution of paid soils and to develop maximum allowable concentrations of platinum in soils of different buffering capacity.

Keywords: ecotoxicity, heavy metals, biotesting, biological properties