

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 628.3:631.879

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-3-188-205

Исследование экологических и агрохимических показателей осадков сточных вод методом фитотестирования

Светлана Александровна Манжина¹, Татьяна Ильинична Дрововозова²,
Лев Игоревич Русин³

^{1,2,3}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация

¹manz.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-0843>

²tid70.drovovozova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8724-7799>

³leva19111@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0007-8802-4726>

Аннотация. Цель: оценка экологических и агрохимических показателей осадков сточных вод муниципальных очистных сооружений посредством фитотестирования. **Материалы и методы.** Исследовались осадки сточных вод муниципальных очистных сооружений с трехлетним сроком пребывания на иловой карте. Обследуемые осадки имеют в своем составе высокое количество сульфат-ионов (0,720 г/100 г) при содержании ионов кальция 0,350 г/100 г. Остальные ионы солей и тяжелые металлы находятся в незначительном количестве. Фитотестирование проводили путем исследования фитоотклика семян тест-растений при контактировании с водной вытяжкой и непосредственно с осадками. В первом варианте приготовлены растворы различной концентрации: водная вытяжка осадков, ее двукратное разбавление, четырех- и восьмикратное разбавление. Для контроля показателей использовалась дистиллированная вода и однокомпонентные модельные растворы сульфата натрия с идентичными тестируемыми растворам концентрациями. Тестирование проводилось на семенах овса и вики. Во втором варианте в лабораторных условиях производился посев семян овса, вики, белой горчицы, редиса и кресс-салата в вегетационные сосуды с осадками сточных вод. **Результаты и обсуждение.** Фитотестирование позволило выявить комплексный эффект осадков, обусловленный их составом. В варианте неразбавленной водной вытяжки из осадков сточных вод проявляется ингибирующее действие сульфатов на всхожесть семян и рост биомассы. В варианте с двукратным разбавлением отмечено стимулирующее действие компонентов осадков на всхожесть семян и рост биомассы. Для уточнения эффекта стимулирующего действия осадков сточных вод проведен опыт по высеву тест-растений непосредственно в осадки. Наилучшие показатели отмечены в вариантах с посевом овса. **Выводы.** Ингибирующее действие осадков сточных вод муниципальных очистных сооружений г. Новочеркаска обусловлено содержанием в них сульфатов. Наилучшая сопоставимость показателей в обоих вариантах отмечена у семян овса.

Ключевые слова: осадки сточных вод, тест-растения, фитотоксичность, ингибирование, стимулирование, прирост биомассы, всхожесть, энергия прорастания семян

Для цитирования: Манжина С. А., Дрововозова Т. И., Русин Л. И. Исследование экологических и агрохимических показателей осадков сточных вод методом фитотестирования // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 188–205. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-188-205>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Study of environmental and agrochemical indicators of sewage sludge by phytotesting

Svetlana A. Manzhina¹, Tatyana I. Drovovozova², Lev I. Rusin³

^{1, 2, 3}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹manz.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-0843>

²tid70.drovovozova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8724-7799>

³leva19111@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0007-8802-4726>

Abstract. Purpose: to assess environmental and agrochemical indicators of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants through phytotesting. **Materials and methods.** Sewage sludge from municipal wastewater treatment plants with a three-year stay on the sludge map was studied. The examined sludge contains a high amount of sulfate ions (0.720 g/100 g) with a content of calcium ions of 0.350 g/100 g. The remaining salt ions and heavy metals are in small quantities. Phytotesting was carried out by studying the phytore-sponse of the test plants seeds in contact with an aqueous extract and directly with precipitation. In the first variant, solutions of various concentrations were prepared: an aqueous extract of sediments, its two-fold dilution and four- and eight-fold dilution. To control the indicators, the distilled water and one-component model solutions of sodium sulfate with concentrations identical to the tested solutions were used. Testing was carried out on the seeds of oats and vetch. In the second variant, under laboratory conditions, seeds of oats, vetch, white mustard, radish and watercress were sown in vegetation vessels with sewage sludge. **Results and discussion.** Phytotesting allowed revealing the complex effect of precipitation due to their composition. In the variant of undiluted aqueous extract from sewage sludge, the inhibitory effect of sulfates on seed germination and biomass growth is revealed. In the variant with two-fold dilution, the stimulating effect of precipitation components on seed germination and biomass growth was noted. To clarify the effect of the stimulating effect of sewage sludge, an experiment on sowing test plants directly into the sludge was carried out. The best indicators were noted in the variants with oats sowing. **Conclusions.** The inhibitory effect of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants in Novocherkassk is due to the content of sulfates in them. The best comparability of indicators in both variants was noted for oat seeds.

Keywords: sewage sludge, test plants, phytotoxicity, inhibition, stimulation, biomass growth, germination, germination readiness

For citation: Manzhina S. A., Drovovozova T. I., Rusin L. I. Study of environmental and agrochemical indicators of sewage sludge by phytotesting. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(3):188–205. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-188-205>.

Введение. Осадки сточных вод (далее – ОСВ) являются крупнотоннажным отходом муниципальных очистных сооружений. Состав осадков определяется составом очищаемых стоков, которые формируются в зависимости от социально-экономической сферы населенного пункта. В соответствии с накопленными данными, значительную часть ОСВ составляют

органические вещества [1–4], что делает их важным компонентом для создания органоминеральных удобрений. Помимо органического вещества, в составе ОСВ обнаруживаются ионы минеральных солей и тяжелые металлы [5–10], в связи с чем применение их в качестве удобрений требует подбора экологически безопасных и агрономически эффективных доз либо смешения с дополнительными компонентами с целью корректировки состава. Для формирования комплексного органоминерального удобрения на основе ОСВ необходимо определиться с допустимой концентрацией потенциально токсичных элементов. При этом следует учитывать, что излишнее разбавление ОСВ другим составом может сократить их положительный агрохимический эффект, это приведет к излишнему удорожанию органоминерального удобрения за счет усложнения технологии изготовления (даже если предположить, что дополнительные компоненты будут условно бесплатными).

ОСВ по существу своего образования являются отходом, а в соответствии с СП 2.1.7.1386-03¹ необходимо производить «оценку токсичности отхода методами биотестирования на гидробионтах и в фитотесте». Помимо этого, существует ряд апробированных методик биотестирования загрязненных почв, их смесей, компостов, ила и т. д., которые позволяют получить хорошо сопоставимые результаты по присутствию токсических веществ в исследуемых объектах [11, 12].

На основании изложенного целью исследования стала оценка экологических и агрохимических показателей ОСВ муниципальных очистных сооружений посредством фитотестирования.

Материалы и методы. В качестве материала для исследований были отобраны ОСВ муниципальных очистных сооружений г. Новочеркаска

¹Определение класса опасности токсичных отходов производства и потребления [Электронный ресурс]: СП 2.1.7.1386-03: утв. Гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 16.06.03: введ. в действие с 30.06.03. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

Ростовской области (Кадамовские очистные сооружения ООО «Экологические технологии») с трехлетним сроком пребывания на иловой карте. Обследуемые осадки имеют в своем составе высокое количество сульфат-ионов (0,720 г/100 г) при содержании ионов кальция 0,350 г/100 г. Остальные ионы солей находятся в незначительном количестве. Поэтому по содержанию сульфат-иона осадки характеризуются как средnezасоленные (Е. И. Панкова и др., 2017)². Содержание тяжелых металлов в них (в валовой и подвижной формах) не превышает допустимых значений в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21³ и ГОСТ Р 17.4.3.07-2001⁴. Показатель рН = 6,02 характеризует данный субстрат как слабокислый. В составе ОСВ определено 11,1 %⁵ органического вещества и высокое содержание питательных элементов: 166,5 мг/кг фосфора⁶, 139,36 мг/кг азота⁷ и 552,7 мг/кг калия⁸.

Фитотестирование может осуществляться двумя способами: 1) размещением семян тест-растений в водной вытяжке; 2) посевом семян непосредственно в ОСВ [11, 12]. В первом случае оценивается воздействие растворимых веществ, которые переходят в водную вытяжку, во втором – со-

²Руководство по управлению засоленными почвами / под ред. Р. Варгаса, Е. И. Панковой, С. А. Балюка, П. В. Красильникова, Г. М. Хасанхановой; ФАО. Рим, 2017. 153 с.

³Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]: СанПиН 1.2.3685-21: утв. Гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 28.01.21: введ. в действие с 01.03.21. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁴ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений [Электронный ресурс]. Введ. 2001-01-23. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁵ГОСТ 26213-21. Почвы. Методы определения органического вещества [Электронный ресурс]. Введ. 2021-08-31. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁶ГОСТ 26205-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Мачигина в модификации ЦИНАО [Электронный ресурс]. Введ. 1991-12-29. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁷Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли азота нитратов в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, отходов производства и потребления фотометрическим методом с салициловой кислотой [Электронный ресурс]: ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.67-10. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁸Спектрометр атомно-адсорбционный «Квант-2А». Руководство по эксплуатации ГКНЖ 30.00.000 РЭ.

вокупности растворимых и нерастворимых веществ, что позволяет сформировать более полное представление о тестируемом объекте.

В процессе выявления фитотоксичности тестируемых субстратов используют разные тест-функции (параметры), определяя отклик растений по ним, который позволяет выявить фитотоксичный эффект. При оценке фитотоксичного эффекта по какому-либо параметру (масса растений, длина корней, длина ростков и т. д.) расчет ведут по формуле:

$$\Phi \text{Э} = \frac{(\text{ТФ}_\text{к} - \text{ТФ}_\text{о}) \cdot 100 \%}{\text{ТФ}_\text{к}},$$

где $\Phi \text{Э}$ – фитотоксичный эффект по параметру, %;

$\text{ТФ}_\text{к}$ – тест-функция растений в контроле;

$\text{ТФ}_\text{о}$ – тест-функция растений на фитотоксичной среде.

Уровень фитотоксичности оценивается по следующим показателям:

$\Phi \text{Э} < 10 \%$ – токсичность отсутствует;

$\Phi \text{Э} = 10 \dots 30 \%$ – слабый уровень токсичности;

$\Phi \text{Э} = 30 \dots 50 \%$ – средний уровень токсичности;

$\Phi \text{Э} > 50 \%$ – высокий уровень токсичности.

Среднеквадратичное отклонение в полученной выборке тест-откликов определялось по стандартной формуле.

Непосредственно всхожесть семян (в %) определяется по формуле:

$$B = \frac{a}{b} \cdot 100 \% ,$$

где B – энергия прорастания или всхожесть, %;

a – число проросших семян, шт.;

b – общее число семян, взятых для опыта, шт.

В заключение определяется индекс токсичности фактора (ИТФ), который позволяет судить о совокупности откликов тест-растения по контролируемым параметрам:

$$\text{ИТФ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\text{ТФ}_{\text{O}_i}}{\text{ТФ}_{\text{K}_i}}}{n},$$

где ИТФ – индекс токсичности регистрируемых факторов;

n – количество тест-функций, шт.;

i – контролируемая тест-функция;

ТФ_{O_i} – значение регистрируемой функции в опыте;

ТФ_{K_i} – значение регистрируемой функции в контроле.

Экотоксикологическую оценку тестируемого ОСВ по ИТФ проводили с использованием шкалы (Р. Р. Кабиров и др., 1997) [13, 14] (таблица 1).

Таблица 1 – Оценочная шкала токсичности растительного субстрата
Table 1 – Evaluation scale of plant substrate toxicity

Класс токсичности	ИТФ	Пояснение
VI	> 1,10	Стимуляция. Величина тест-функции превышает контрольные значения
V	0,91–1,1	Норма. Значимых снижений и увеличений тест-функций не регистрируется
IV	0,71–0,90	Низкая. Слабое отклонение показателей тестируемых функций от нормы
III	0,51–0,70	Средняя. Небольшое снижение величины тест-функций
II	< 0,50	Высокая. Сильное снижение величины тест-функций
I	–	Сверхвысокая. Гибель тест-объекта

Оценка фитотоксичности ОСВ была проведена по двум вариантам. Вариант 1: оценка воздействия растворимых веществ, перешедших в водную вытяжку из ОСВ. Для приготовления водной вытяжки ОСВ в воздушно-сухом состоянии просеян через сито, отобрано 50 г пробы, после чего добавлено 250 мл (0,25 л) дистиллированной воды. Полученная смесь отстаивалась в течение суток, после чего снова хорошо перемешивалась и была отфильтрована через бумажный фильтр. В 100 г почвы содержится 720 мг сульфат-иона, соответственно, в 50 г почвы – 360 мг. Если учесть, что эквивалент сульфат-иона равен 48 мг/ммоль, полученная концентрация раствора водной вытяжки по исследуемому иону составит:

$$C = \frac{m}{\Xi_{\text{SO}_4^{2-}} \cdot V_{\text{р-ра}}} = \frac{360}{48 \cdot 0,3} = 25 \text{ ммоль/дм}^3 \text{ (мг-экв./дм}^3\text{)},$$

где m – масса сульфат-иона, мг;

$\Xi_{\text{SO}_4^{2-}}$ – эквивалентная масса сульфат-иона, мг-экв.;

$V_{\text{р-ра}}$ – объем раствора, л.

Из полученной водной вытяжки приготовлены растворы различной концентрации: неразбавленный раствор, с двукратным разбавлением, с четырех- и восьмикратным разбавлением, что по содержанию сульфат-иона соответствует: 1 – 25 ммоль/дм³, 2 – 12,5 ммоль/дм³, 3 – 6,25 ммоль/дм³, 4 – 3,125 ммоль/дм³. Для контроля была взята дистиллированная вода и однокомпонентные модельные растворы сульфата натрия с концентрациями, идентичными тестируемым. Несмотря на высокое содержание кальция в ОСВ, в качестве носителя сульфат-иона выбран сульфат натрия, так как сульфат кальция – малорастворимое вещество и непригоден для приготовления гомогенных растворов.

Согласно рекомендациям МР 2.1.7.2297-07⁹, овес в качестве тест-растения дает хорошо сопоставимые показатели по фитотоксическим эффектам, поэтому в качестве тест-растения взяты семена овса – представителя однодольных растений семейства злаковых. Семена размещали в чашках Петри на фильтровальной бумаге, после чего в сосуды было добавлено по 5 мл контрольного, тестируемых и модельных растворов. Опыт проводился в трехкратной повторности. Чашки термостатировались в течение 7 дней при температуре 25 °С (согласно рекомендациям МР 2.1.7.2297-07), после чего производилась оценка всхожести семян, замер длины корней и ростков.

⁹2.1.7. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности. Методические рекомендации МР 2.1.7.2297-07: утв. Рук. Федер. службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации Г. Г. Онищенко 10.10.07: введ. в действие с 28.12.07. М.: ФЦГиЭ Роспотребнадзора, 2008. 15 с.

В качестве контрольных величин оценивали всхожесть семян, длину корней и ростков. Линейные параметры измеряли линейкой с точностью до 1 мм.

Вариант 2: вегетационный опыт с ОСВ. Вегетационный метод исследования предполагает выращивание растений в вегетационных сосудах в контролируемых (либо одинаковых) условиях произрастания с целью выявления действия на растения изучаемых почв согласно ГОСТ Р ИСО 22030-2009¹⁰. В нашем случае были проведены исследования фитотоксичности осадков в так называемом вегетационном помещении, в котором вегетационные сосуды были расположены на плоскости с одинаковым уклоном, освещением и влажностью воздуха. Статичность температурного режима не поддерживалась. В период наблюдения температура окружающей среды колебалась в пределах 20–27 °С. Полив всех сосудов проводился одновременно, по необходимости. Тестируемый субстрат из ОСВ имеет во всех случаях однородный состав. ОСВ были предварительно просеяны через сито 5 мм в целях удаления крупных включений, после чего помещены в вегетационные сосуды высотой 15 см. Общая масса ОСВ в сосуде – 1 кг. Поверхность выравнивалась, и в углубления 0,5–1,0 см помещались семена тестируемых растений (одно- и двудольных) следующего состава:

- овес (*Avena sativa* L.) – однодольное растение, семейство злаковых;
- редис (*Raphanus sativus*) – двудольное растение, семейство крестоцветных [15];
- вика (*Vicia sativa* L.) – двудольное растение, семейство бобовых;
- белая горчица (*Sinapis alba* L.) – двудольное растение, семейство крестоцветных;

¹⁰ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений [Электронный ресурс]. Введ. 2009-12-15. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

- кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) – двудольное растение, семейство крестоцветных.

В качестве контроля семена высевались в почву, отобранную с территории экосистемы роши Красная весна (г. Новочеркасск), функционирующей как природная. Содержание органического вещества и питательных элементов в контрольной почве находится на высоком уровне для обеспечения роста и развития растений: органическое вещество – 7 %, азота нитратов – 117,73 мг/кг, фосфора (подвижная форма) – 38,7 мг/кг и калия – 399,5 мг/кг. Опыт осуществляли в трехкратной повторности. Наблюдения за виталитетом тест-растений велись в течение месяца. Для предотвращения влияния неравномерности освещения вегетационные сосуды переставляли случайным образом каждые 4 дня. По окончании срока наблюдения растения были срезаны и взвешена их наземная часть для оценки прироста биомассы. Контролируемыми параметрами являлись всхожесть семян и вес наземной части биомассы. Весовой параметр определяли на электронных весах модели ЛВ-210-А.

Отбор семян для посева производили по массе (исключая слишком тяжелые и слишком легкие) и по внешнему виду (изменение цвета, размера, наличие повреждений), чтобы нивелировать влияние качества семян на ход эксперимента.

Результаты и обсуждение. Фитотестирование по выявлению граничных значений ингибирующего действия сульфат-иона в составе ОСВ показало следующие результаты. В варианте с неразбавленной водной вытяжкой ОСВ наблюдалось ингибирование всхожести семян, роста корней и проростков. В варианте с двукратным разведением водной вытяжки наблюдалось наибольшее количество проросших семян и наибольший прирост биомассы как корней, так и проростков семян, что, по нашему мнению, указывает на уменьшение ингибирующего эффекта сульфатов и про-

явление стимулирующего воздействия других компонентов ОСВ. В пользу стимулирующего влияния дополнительных компонентов раствора водной вытяжки из ОСВ говорит и тот факт, что увеличение кратности его разбавления не привело к росту образования биомассы.

Расчет ИТФ показал, что в вариантах с неразбавленным раствором и с модельным раствором двукратного разбавления наблюдается низкий токсический эффект, при двукратном разбавлении водной вытяжки из ОСВ наблюдается стимулирующий эффект, в остальных случаях значимых снижений и увеличений тест-функций не регистрируется.

Результаты фитотестирования на семенах овса приведены в таблице 2.

Оценка ингибирующего и стимулирующего эффекта растворимых компонентов ОСВ, производимого на семена овса, приведена на рисунках 1–4.

Следует отметить, что ряд авторов указывает: показатель длины проростков наиболее информативен [12, 13], это, по нашему мнению, является показательным и в нашем исследовании.

При фитотестировании ОСВ посевом семян тест-растений регистрируемыми показателями стали всхожесть семян, общий прирост биомассы и среднестатистический прирост биомассы на одно растение. Результаты наблюдений приведены в таблице 3.

При посеве растений в ОСВ вика наравне с овсом показала достаточно высокую всхожесть. Наихудшая всхожесть наблюдалась у семян редиса, что может быть связано с его большей чувствительностью к сульфат-иону. Наибольший токсический эффект по ИТФ ОСВ оказал на семена белой горчицы, что хорошо видно по ФЭ всхожести этого растения. В целом ОСВ показал высокий уровень токсичности для редиса и белой горчицы, для кресс-салата – средний и для растений овса и вики – слабый.

Таблица 2 – Результаты исследований фитотоксичности водной вытяжки осадков сточных вод на семенах овса
Table 2 – Results of studies of the phytotoxicity of the aqueous extract of sewage sludge on oat seeds

№ раствора	Концентрация раствора по сульфат-иону, ммоль/дм ³	Всхожесть, %		Длина корней				Длина ростков, мм				ИТФ
		Среднестатистическая	ФЭ	Минимальная, мм	Максимальная, мм	Средняя		Минимальная, мм	Максимальная, мм	Средняя		
						Показатель, мм	ФЭ, %			Показатель, мм	ФЭ, %	
Контроль												
1	0	97,00 ± 1	–	7,0	66,0	27,0 ± 5,5	0,0	12,0	106,0	66,5 ± 5,2	0,0	–
Водная вытяжка из ОСВ												
2	25*	55,00 ± 1	43,3	6,0	55,0	27,8 ± 4,0	–2,96	10,0	106,0	57,8 ± 4,1	13,1	0,85
3	12,5	97,42 ± 1	–0,43	8,0	77,0	36,2 ± 4,1	–34,07	17,0	115,0	84,8 ± 4,8	–27,5	1,20
4	6,25	83,30 ± 1	14,12	5,0	76,0	28,5 ± 4,4	–5,55	10,0	105,0	68,8 ± 4,3	–3,5	0,95
5	3,125	87,42 ± 1	9,88	6,0	57,0	25,0 ± 4,3	7,4	10,0	107,0	66,4 ± 4,2	0,1	0,91
Модельный раствор												
6	25	64,19 ± 1	33,82	8,0	60,0	21,7 ± 4,3	19,63	7,0	93,0	56,0 ± 4,8	15,8	0,83
7	12,5	72,50 ± 1	25,26	6,0	61,0	23,7 ± 4,4	12,22	10,0	96,0	54,6 ± 4,1	17,9	0,85
8	6,25	83,33 ± 1	14,09	8,0	64,0	25,0 ± 5,5	7,41	10,0	101,0	66,0 ± 4,2	0,7	0,95
9	3,125	83,33 ± 1	14,09	7,0	50,0	25,9 ± 4,8	4,07	11,0	106,0	66,5 ± 4,9	0,0	0,93
Примечания «*» – соответствует 0,72 г/100 г почвы; «–» – стимулирующее действие.												

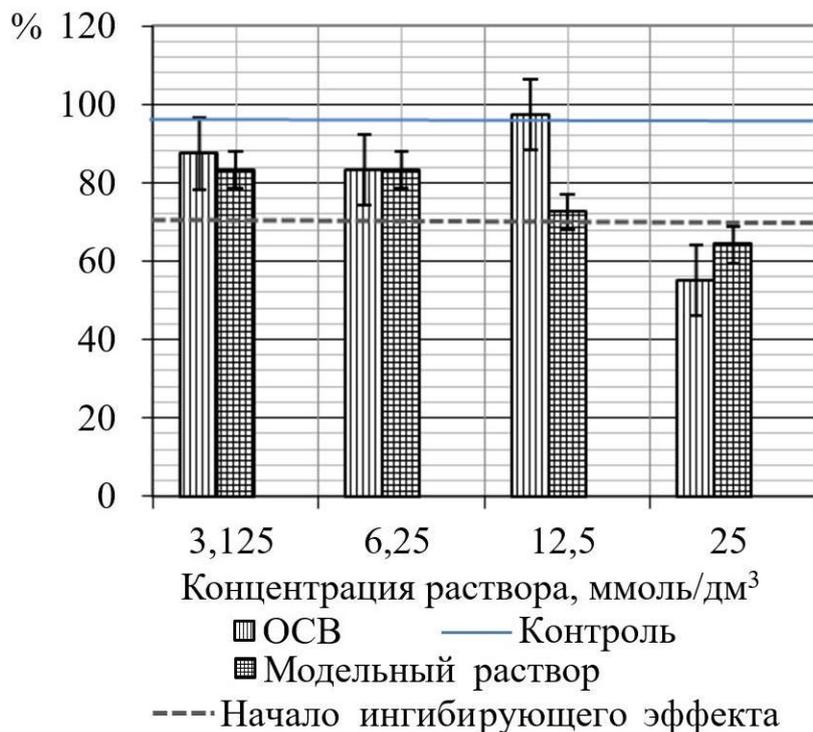


Рисунок 1 – Оценка ингибирующего действия растворов на всхожесть семян овса

Figure 1 – Assessment of the inhibitory effect of solutions on oat seed germination

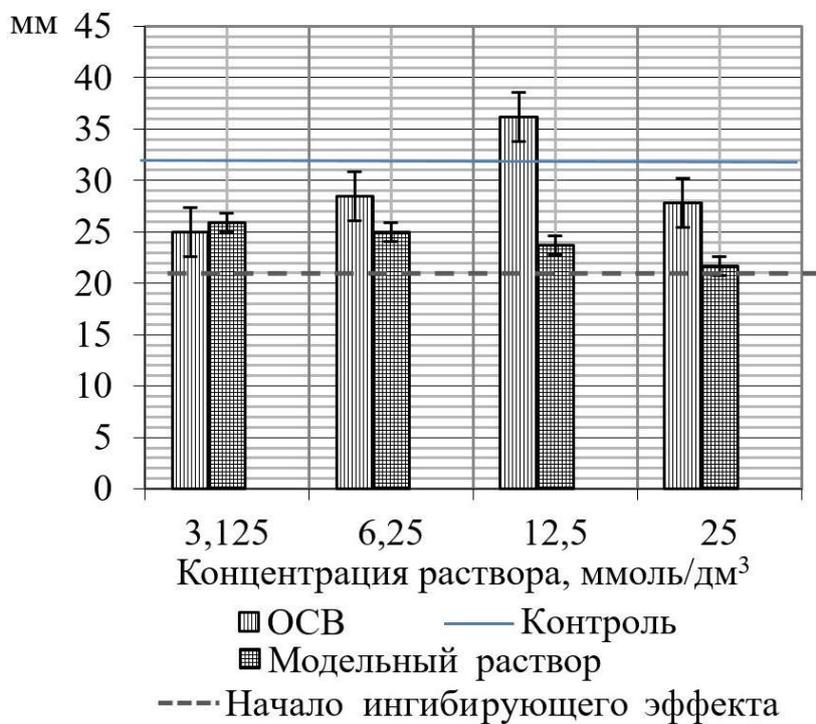


Рисунок 2 – Оценка ингибирующего действия растворов на длину корней овса

Figure 2 – Assessment of the inhibitory effect of solutions on the length of oat roots

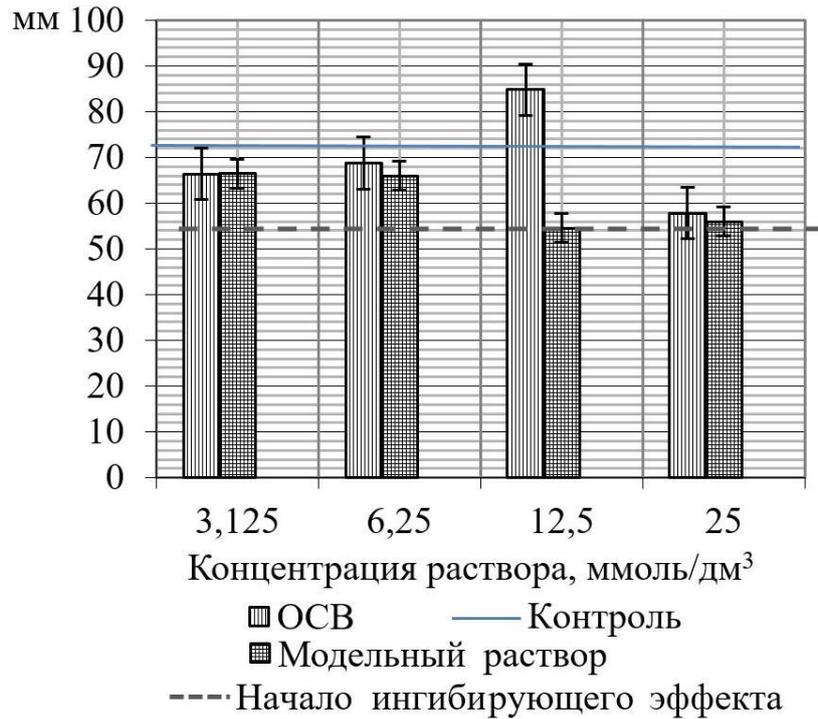


Рисунок 3 – Оценка ингибирующего действия растворов на длину ростков овса

Figure 3 – Assessment of the inhibitory effect of solutions on the length of oat sprouts

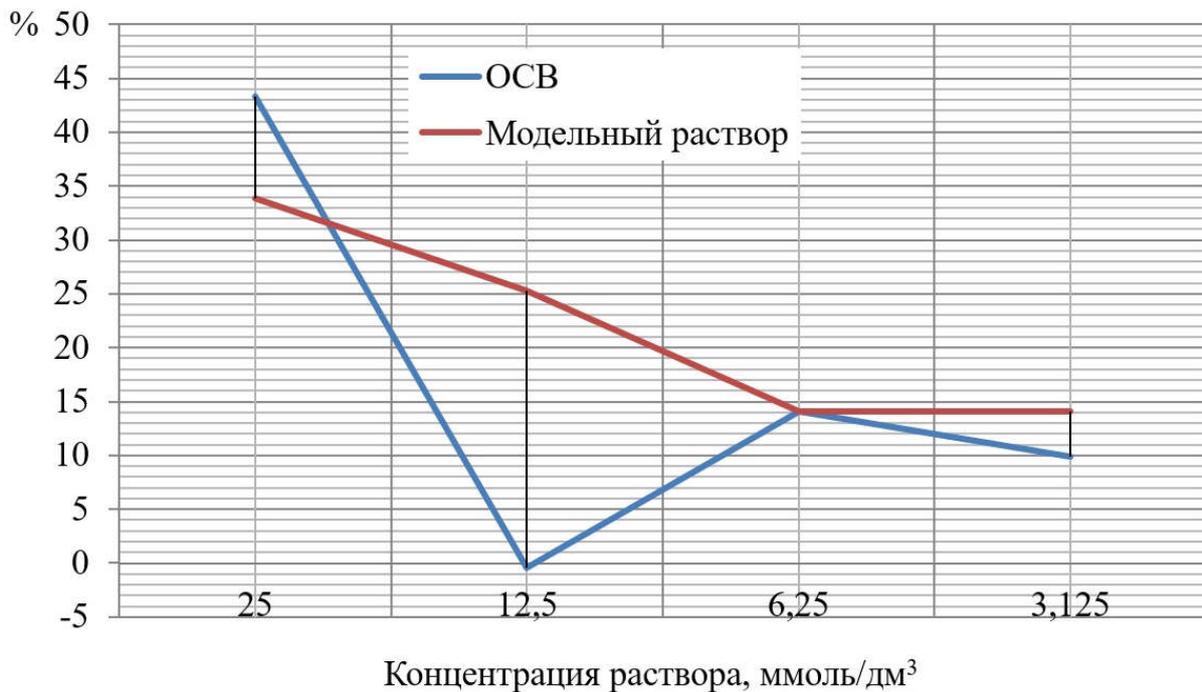


Рисунок 4 – Процент ингибирования тест-отклика по всхожести овса

Figure 4 – The percentage of inhibition of the test response for the oat germination

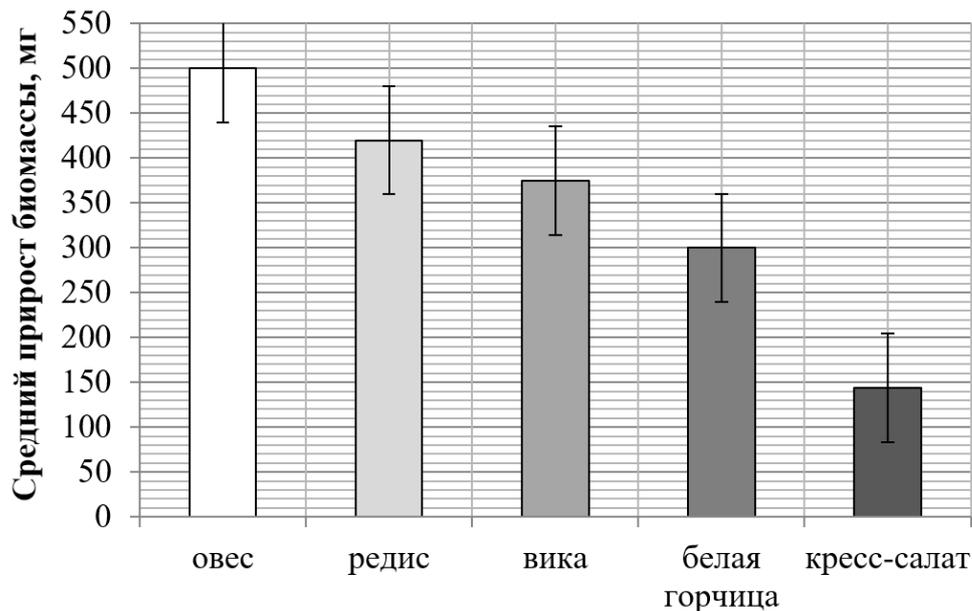
Таблица 3 – Результаты наблюдений за тест-растениями при высеве на осадках сточных вод Кадамовских очистных сооружений ООО «Экологические технологии»

Table 3 – The results of observations over test plants when sowing on sewage sludge from Kadamovskiy treatment facilities of “Ecological Technologies” LLC

Показатель	Вид растения				
	овес	редис	вика	белая горчица	кресс-салат
Всхожесть семян, %					
- на почве	90	75	90	90	70
- на ОСВ	80	35	80	40	45
ФЭ	11,11	53,33	11,11	55,56	35,71
Биомасса на весь урожай, г					
- на почве	3,90	4,80	3,00	2,50	2,30
- на ОСВ	4,00	2,94	3,00	1,20	1,30
Средний прирост биомассы на 1 растение, мг					
- на почве	433,33	380,00	333,33	277,78	143,75
- на ОСВ	500,00	420,00	375,00	300,00	144,44
ФЭ	-15,39	-10,53	-12,50	-8,00	-0,48
ИТФ	0,91	0,73	1,00	0,67	0,74

На 7-й день наблюдений наибольшая высота (длина) ростков отмечалась у редиса, потом у кресс-салата, чуть менее у овса и еще менее у вики и белой горчицы. При этом вика проклюнулась на 2 дня позже остальных растений. Общий прирост биомассы обусловлен количеством всходов, поэтому данный показатель регистрировался с целью оценки среднестатистических показателей на одно растение. Наибольший прирост биомассы на одно растение за период наблюдений зарегистрирован у овса, наименьший – у кресс-салата (рисунок 5).

Выводы. По результатам фитотестирования выявлено, что ингибирующее действие ОСВ муниципальных очистных сооружений г. Новочеркаска (Ростовская область) обусловлено содержанием в них сульфатов. При уменьшении концентрации сульфат-ионов хотя бы вдвое стимулирующее действие питательных компонентов осадков становится преобладающим.



**Рисунок 5 – Оценка прироста биомассы
тестовых растений на осадках сточных вод**

Figure 5 – Assessment of test plant biomass growth on sewage sludge

Проведенные опыты по фитотестированию водной вытяжки продемонстрировали, что семена овса хорошо применимы для тестирования водной вытяжки ОСВ на токсичность. Наиболее информативным показателем с хорошо сопоставимыми результатами в зависимости от концентрации водной вытяжки ОСВ является средняя длина ростков.

При посеве семян тест-растений непосредственно в ОСВ после месячного наблюдения за их ростом и развитием наибольший прирост биомассы на одно растение отмечен у овса (500 мг), наименьший (144,44 мг) – у кресс-салата. Семена вики имели высокую всхожесть наравне с овсом – 80 %, что, по нашему мнению, позволяет использовать эти растения для биологической рекультивации иловых карт муниципальных очистных сооружений.

Список источников

1. Некоторые свойства и особенности осадков сточных вод / Н. Д. Аргунов, О. Б. Ватуева, В. М. Веселов, Н. А. Соломатина, В. А. Пильгун // *Агрехимический вестник*. 2013. № 4. С. 39–43.
2. Касатиков В. А. Использование осадков городских сточных вод // *Агрехимический вестник*. 2013. № 4. С. 44–46.

3. Агроэкологические и технологические аспекты использования осадков городских сточных вод в качестве удобрения / В. А. Касатиков, В. А. Черников, Н. А. Раскатов, Т. Н. Большева // Экологические и технологические вопросы производства и использования органических и органоминеральных удобрений на основе осадков сточных вод и твердых бытовых отходов. Владимир: ВНИПТИОУ, 2004. С. 29–39.
4. Федоровская Л. А., Углов В. А., Бородай Е. В. Агроэкологическая оценка осадков сточных вод очистных сооружений города Новосибирска // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 4. С. 275–279.
5. Манжина С. А. Российские и зарубежные практики обращения с осадком сточных вод // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. 2023. Т. 5, № 1. С. 15–31. URL: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=168> (дата обращения: 01.07.2023). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31>.
6. Zhang X., Wang X.-q., Wang D.-f. Immobilization of heavy metals in sewage sludge during land application process in China // Sustainability. 2017. Vol. 9, iss. 11. <https://doi.org/10.3390/su9112020>.
7. Агроекологічна характеристика осадів стічних вод м. Харкова / Є. В. Скрильник, Н. В. Максименко, Я. С. Рижкова, В. А. Рижков // Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2018. № 1–2(29). С. 112–118. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2018-29-12>.
8. Concentration of Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, and Pb in soil, sugarcane leaf and juice: residual effect of sewage sludge and organic compost application / S. M. Moretti, E. I. Bertoncini, A. C. Vitti, L. R. Alleoni, C. H. Abreu-Junior // Environmental Monitoring and Assessment. 2016. Vol. 188. 163. DOI: 10.1007/s10661-016-5170-1.
9. Roskosch A., Heidecke P. Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland [Elektronische Ressource]. Berlin: Atelier Hauer + Dörfler GmbH, 2018. 104 s. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_u_ba_fb_klaerschlam_bf_low.pdf (Datum der Bewerbung: 09.06.2023).
10. Агрохимические, санитарно-эпидемиологические и токсикологические исследования ОСВ и компостов очистных сооружений г. Москвы, устойчивость функционирования в агроэкосистемах / Е. П. Пахненко, Е. А. Гунина, Г. Е. Мерзлая, Н. В. Костина // Почвы в биосфере: сб. материалов Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 50-летию Ин-та почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, 10–14 сент. 2018 г. Томск: Нац. исслед. Том. гос. ун-т, 2018. Ч. 1. С. 359–363.
11. Маячкина Н. В., Чугунова М. В. Особенности биотестирования почв с целью их экотоксикологической оценки // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2009. № 1. С. 84–93.
12. Тишин А. С. Фитотестирование почв, загрязненных нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 12(102), ч. 2. С. 78–83. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.048>.
13. Кабиров Р. Р., Сагитова А. Р., Суханова Н. В. Разработка и использование многокомпонентной тест-системы для оценки токсичности почвенного покрова городской территории // Экология. 1997. № 6. С. 408–411.
14. Солдатов В. Ю., Шадрин Е. Г., Карпова С. Д. Биотестирование фитотоксичности почвогрунтов г. Якутска с использованием тест-объекта овса посевного *Avena sativa* L. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 24, № 2. С. 76–86. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-24-2-76-86.
15. Гончарова Л. И., Цыгвинцев П. Н., Рачкова В. М. Фитотоксическое действие меди на растения редиса и салата-латука // Агрохимический вестник. 2020. № 4. С. 30–35. DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10052.

References

1. Argunov N.D., Vatieva O.B., Veselov V.M., Solomatina N.A., Pilgun V.A., 2013. *Nekotorye svoystva i osobennosti osadkov stochnykh vod* [Some peculiarities and characteristics of sewage sludge]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 4, pp. 39-43. (In Russian).
2. Kasatkov V.A., 2013. *Ispol'zovanie osadkov gorodskikh stochnykh vod* [Use of urban sewage sludge]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 4, pp. 44-46. (In Russian).
3. Kasatkov V.A., Chernikov V.A., Raskatov N.A., Bolysheva T.N., 2004. *Agroekologicheskie i tekhnologicheskie aspekty ispol'zovaniya osadkov gorodskikh stochnykh vod v kachestve udobreniya* [Agroecological and technological aspects of using urban wastewater sludge as a fertilizer]. *Ekologicheskie i tekhnologicheskie voprosy proizvodstva i ispol'zovaniya organicheskikh i organomineral'nykh udobreniy na osnove osadkov stochnykh vod i tverdykh bytovykh otkhodov* [Ecological and Technological Issues of Production and Use of Organic and Organomineral Fertilizers Based on Sewage Sludge and Municipal Solid Waste]. Vladimir, VNIPTIOU, pp. 29-39. (In Russian).
4. Fedorovskaya L.A., Uglov V.A., Borodai E.V., 2015. *Agroekologicheskaya otsenka osadkov stochnykh vod ochistnykh sooruzheniy goroda Novosibirska* [Agroecological assessment of sewage sludge from treatment plants in Novosibirsk]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], no. 4, pp. 275-279. (In Russian).
5. Manzhina S.A., 2023. [Russian and foreign practices of sewage sludge management]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo*, vol. 5, no. 1, pp. 15-31, available: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=168> [accessed 01.07.2023], <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31>. (In Russian).
6. Zhang X., Wang X.-q., Wang D.-f., 2017. Immobilization of heavy metals in sewage sludge during land application process in China. *Sustainability*, vol. 9, iss. 11, <https://doi.org/10.3390/su9112020>.
7. Skrylnyk Ye.V., Maksymenko N.V., Ryzhkova Ya.S., Ryzhkov V.A., 2018. Agroecological characterization of sewage sludge of Kharkov. *Man and Environment. Issues of Neocology*, no. 1-2(29), pp. 112-118, <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2018-29-12>. (In Ukrainian).
8. Moretti S.M., Bertoncini E.I., Vitti A.C., Alleoni L.R., Abreu-Junior C.H., 2016. Concentration of Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, and Pb in soil, sugarcane leaf and juice: residual effect of sewage sludge and organic compost application. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 188, 163, DOI: 10.1007/s10661-016-5170-1.
9. Roskosch A., Heidecke P., 2018. Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. Berlin, Atelier Hauer + Dörfler GmbH, 104 s., available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschamm_bf_low.pdf (Datum der Bewerbung 09.06.2023). (In German).
10. Pakhnenko E.P., Gunina E.A., Merzlaya G.E., Kostina N.V., 2018. *Agrokhimicheskie, sanitarno-epidemiologicheskie i toksikologicheskie issledovaniya OSV i kompostov ochistnykh sooruzheniy g. Moskvy, ustoychivost' funktsionirovaniya v agroekosistemakh* [Agrochemical, sanitary-epidemiological and toxicological studies of sewage sludge and composts from Moscow wastewater treatment plants, stability of functioning in agroecosystems]. *Pochvy v biosfere: sb. materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta pochvovedeniya i agrokhimii SO RAN* [Soils in the Biosphere: Proc. of the All-Russian Scientific Conference with International Participation, Dedicated to the 50th Anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences]. Tomsk, National Research Tomsk State University, pt. 1, pp. 359-363. (In Russian).

11. Mayachkina N.V., Chugunova M.V., 2009. *Osobennosti biotestirovaniya pochv s tsel'yu ikh ekotoksikologicheskoy otsenki* [Peculiarities of soil biotests to evaluate soil ecotoxicity]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* [Bulletin of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], no. 1, pp. 84-93. (In Russian).

12. Tishin A.S., 2020. *Fitotestirovanie pochv, zagryaznennykh nefteproduktami* [Phytotesting of soils contaminated with petroleum products]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], no. 12(102), pt. 2, pp. 78-83, <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.048>. (In Russian).

13. Kabirov R.R., Sagitova A.R., Sukhanova N.V., 1997. *Razrabotka i ispol'zovanie mnogokomponentnoy test-sistemy dlya otsenki toksichnosti pochvennogo pokrova gorodskoy territorii* [Development and use of a multicomponent test system for evaluating the toxicity of the soil cover of an urban territory]. *Ekologiya* [Ecology], no. 6, pp. 408-411. (In Russian).

14. Soldatova V.Yu., Shadrina E.G., Karpova S.D., 2018. *Biotestirovanie fitotoksichnosti pochvogruntov g. Yakutsk s ispol'zovaniem test-ob"ekta ovsa posevnogo Avena sativa L.* [Biotesting of phytotoxicity of soils in Yakutsk using oat (*Avena sativa* L.) as test-object]. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики* [Arctic and Subarctic Natural Resources], vol. 24, no. 2, pp. 76-86, DOI: 10.31242/2618-9712-2018-24-2-76-86. (In Russian).

15. Goncharova L.I., Tsygvintsev P.N., Rachkova V.M., 2020. *Fitotoksicheskoe deystvie medi na rasteniya redisa i salata-latuka* [Influence of copper soil pollution on crop and metal content in radish and lettuce plants]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 4, pp. 30-35, DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10052. (In Russian).

Информация об авторах

С. А. Манжина – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент;
Т. И. Дрововозова – ведущий научный сотрудник, доктор технических наук, доцент;
Л. И. Русин – аспирант.

Information about the authors

S. A. Manzhina – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
T. I. Drovovozova – Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;
L. I. Rusin – Postgraduate Student.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата,
самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical
violations in scientific publications.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 16.06.2023; одобрена после рецензирования 10.08.2023;
принята к публикации 10.08.2023.*

*The article was submitted 16.06.2023; approved after reviewing 10.08.2023; accepted for
publication 10.08.2023.*