

Мария Викторовна Никитина^{1✉}, Елена Николаевна Наквасина², Сергей Викторович Коптев³

^{1,2,3}Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

¹m.nikitina@narfu.ru

²e.nakvasina@narfu.ru

³s.koptev @narfu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИТОТОКСИЧНОСТИ СУБСТРАТОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ АКТИВНОГО ИЛА В ВЕГЕТАЦИОННЫХ ОПЫТАХ

Цель исследования – определение фитотоксичности компонентов и субстратов с использованием отходов очистных сооружений Архангельского целлюлозно-бумажного комбината. Субстраты изготавливали на основе верхового торфа со степенью разложения 15 %, с добавкой Биогумуса «Архангельский», который представляет собой компостированный остаточный активный ил очистных сооружений (ОАИ). Для тестирования вытяжек из материалов, применяемых для подготовки опытных субстратов, использовали овес посевной (*Avena sativa* L.) и кресс-салат (*Lepidium sativum* L.). Сравнение проводили с дистиллированной водой и смесью Кнопа. Для подбора оптимального для произрастания растений соотношения остаточного активного ила и торфа был поставлен модельный опыт с выращиванием овса посевного. Исследованы субстраты, приготовленные по объему фракций с градацией активного ила 10 %. Установлено, что компостированный активный ил не обладает фитотоксичностью по отношению к тест-объектам. Вытяжка на основе обезвоженного активного ила очистных сооружений Архангельского целлюлозно-бумажного комбината не оказывает угнетающего действия на прорастание тест-объектов – семян овса и кресс-салата, а согласно показателям длины корня и колеоптиля овса оказывает стимулирующее действие, сопоставимое или превышающее действие смеси Кнопа. Фитостимулирующего эффекта вытяжки торфа не обнаружено. Добавка ОАИ в верховой торф при приготовлении субстратов положительно влияет на показатели роста. Отмечается увеличение длины стебля и корня, массы подземной и надземной частей растений. Оптимальной в субстрате для выращивания овса является добавка компостированного активного ила в количестве 10–20 %. При больших долях добавки компостированных отходов активного ила (более 40 %) рост овса снижается, но масса стеблей и корней увеличивается.

Ключевые слова: фитотоксичность, субстраты, торф, отходы активного ила, овес посевной (*Avena sativa* L.)

Для цитирования: Никитина М.В., Наквасина Е.Н., Коптев С.В. Определение фитотоксичности субстратов на основе отходов активного ила в вегетационных опытах // Вестник КрасГАУ. 2024. № 6. С. 53–61. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-6-53-61.

Благодарности: исследования проводились при финансировании НОЦ «Русская Арктика: современные материалы, методы, технологии», Подпроект 4 «Исследования и подбор оптимального состава субстрата (грунта) для выращивания саженцев (сеянцев) хвойных пород применительно к условиям лесовосстановления на лесосырьевой базе предприятий ООО ПКП «Титан» и АО «Архангельский ЦБК».

Maria Viktorovna Nikitina ^{1✉}, Elena Nikolaevna Nakvasina², Sergey Viktorovich Koptev³

^{1,2,3}Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

¹m.nikitina@narfu.ru

²e.nakvasina@narfu.ru

³s.koptev @narfu.ru

DETERMINATION OF SUBSTRATES PHYTOTOXICITY BASED ON WASTE ACTIVATED SLUDGE IN VEGETATION EXPERIMENTS

*The aim of the study is to determine the phytotoxicity of components and substrates using waste from the treatment facilities of the Arkhangelsk Pulp and Paper Mill. The substrates were made on the basis of high-moor peat with a decomposition degree of 15 %, with the addition of Biohumus Arkhangelsky, which is composted residual activated sludge from treatment facilities (RAS). To test extracts from materials used to prepare experimental substrates, oats (*Avena sativa* L.) and watercress (*Lepidium sativum* L.) were used. Comparison was carried out with distilled water and Knop's mixture. To select the optimal ratio of residual activated sludge and peat for plant growth, a model experiment was conducted with growing oats. The substrates prepared by the volume of fractions with a gradation of activated sludge of 10 % were studied. It was found that composted activated sludge does not have phytotoxicity in relation to the test objects. The extract based on dewatered activated sludge of the treatment facilities of the Arkhangelsk Pulp and Paper Mill does not have a depressing effect on the germination of test objects – oat and watercress seeds, and according to the indicators of the length of the root and coleoptile of oats, it has a stimulating effect comparable to or exceeding the effect of the Knop mixture. Phytostimulating effect of peat extract was not detected. The addition of OAI to high-moor peat during the preparation of substrates has a positive effect on growth indicators. An increase in the length of the stem and root, the mass of the underground and aboveground parts of plants is noted. The optimal addition to the substrate for growing oats is composted activated sludge in the amount of 10–20 %. With large proportions of composted activated sludge waste (more than 40 %), oat growth decreases, but the mass of stems and roots increases.*

Keywords: *phytotoxicity, substrates, peat, activated sludge waste, oats (*Avena sativa* L.)*

For citation: *Nikitina M.V., Nakvasina E.N., Koptev S.V. Determination of substrates phytotoxicity based on waste activated sludge in vegetation experiments // Bulliten KrasSAU. 2024;(6): 53–61 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-6-53-61.*

Acknowledgments: *the research has been financed by the Research Center "Russian Arctic: Modern Materials, Methods, Technologies", Subproject 4 "Research and selection of the optimal composition of substrate (soil) for growing seedlings (seedlings) of coniferous species in relation to the conditions of reforestation on the raw material base of the enterprises of LLC PKP "Titan" and JSC "Arkhangelsk Pulp and Paper Mill".*

Введение. Приготовление субстратов для выращивания посадочного материала в тепличных условиях является актуальной задачей, особенно в вопросе использования компонентов, производимых в региональных условиях с учетом элементов ресурсосбережения. В приготовлении грунтов для теплиц традиционно применяют почву, торф, минеральные и органические удобрения и др. [1, 2]. В органические компоненты могут вводить различные добавки, одной из которых традиционно считаются отработанные активные илы очистных сооружений различных производств [3].

Существуют различные способы утилизации отходов активного ила [4]. Наиболее популярные из них – сжигание, хранение на иловых площадках, применение в биологической рекультивации грунтов, использование в качестве удобрений и мелиорантов [5–9]. Также есть исследования применения остаточного активного ила в качестве компонентов субстратов для вы-

ращивания растений с закрытой корневой системой [10]. При правильном их использовании такие субстраты могут выступать альтернативой обычным торфяным субстратам [11, 12] и привести к экономии при замене коммерческих субстратов и применении минеральных удобрений [13, 14]. Согласно исследованиям, обезвоженный активный ил очистных сооружений может содержать тяжелые металлы, что ограничивает его использование в качестве мелиоранта или удобрения [15–19]. Учитывая возможную токсичность отходов активного ила, для использования в сельском и лесном хозяйстве их необходимо перерабатывать, подготавливая к технологическим процессам дальнейшего применения, в том числе компостированию.

Цель исследований – изучить фитотоксичность компонентов и субстратов, приготовленных на основе разного состава из компостированного остаточного активного ила Архангельского целлюлозно-бумажного комбината и вер-

хового торфа, используя в качестве тест-объектов овес и кресс-салат.

Материалы и методы. Для приготовления субстратов использовали торф с предприятия «Архангельская клюква» с глубины торфяной залежи 40–80 см и степенью разложения 15 %. Вторым компонентом выступал компостированный активный ил (ОАИ) очистных сооружений Архангельского целлюлозно-бумажного комбината (АЦБК) с коммерческим названием Биогумус «Архангельский». Для данного биогумуса при поддержке АЦБК предприятием «Биолаборатория» (г. Архангельск) разработан регламент (срок действия 2014–2024 гг.) на его производство и

использование. Согласно данным исследованиям, отходы активного ила АЦБК относятся к веществам 5-го класса опасности (Протокол 10-БО от 23.04. 2018 г.), яйца гельминтов отсутствуют (Протокол лабораторных испытаний от 2021 г.). Содержание тяжелых металлов в составе компостированного активного ила: медь – 840 мг/кг; цинк – 530; железо – 4 600; марганец – 1 800; никель – 42 мг/кг, что превышает, согласно ГОСТ 17.4.3.07-2001, нормативы содержания для осадков 1-й группы по меди в 1,12 раза. Торф и биогумус были высушены, размолоты и просеяны через сито 2 мм. Характеристика исходных компонентов представлена в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика исходных компонентов

Компонент	Плотность сложения, г/см ³	Истинная плотность, г/см ³	Полная полевая влагемкость, %	Пористость, %	Зольность, %	рН сол	Содержание, мг/кг			
							NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	P ₂ O ₅	K ₂ O
Торф	0,046±0,003	0,768	1778,6	94,0	2,3±0,1	3,2±0,1	<25	54,0±10,0	24 ±10	56±10
Ил	0,381±0,001	1,440	227,0	73,5	29,0±0,5	6,4±0,01	<25	<14	1161±38	51±9

У этих компонентов была определена фитотоксичность – один из эффективных показателей, дающих информацию о суммарном негативном влиянии на объекты исследования. Исследование проводили на 2 тест-объектах – овес посевной (*Avena sativa* L.) и кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) методом проращивания.

При постановке опыта по влиянию смеси компонентов на всхожесть семян тест-объектов в качестве контроля отсутствия фитотоксического эффекта использовали дистиллированную воду, а для контроля фитостимулирующего эффекта – смесь Кнопа. Для получения вытяжек в течение 1 часа интенсивно перемешивали компоненты при соотношении активный ил : вода / смесь Кнопа в количестве 1:10. 25 семян тест-культур помещали в вытяжки в чашках Петри в 5-кратной повторности. Через 72 часа нахождения в термостате при 25 °С проводили определение количественных и биометрических показателей – длины корня (см), длины coleoptilia/гипокотилия (см) и энергии прорастания семян (%), которая рассчитывалась как отношение числа проросших семян к общему числу семян.

Модельный опыт по выращиванию растений овса был проведен с целью определения влияния субстрата на основе разного соотношения ОАИ и торфа верховых болот на количественные и биометрические показатели для подбора оптимального для произрастания растений соотношения остаточного активного ила и торфа. Были подготовлены композиции субстратов из верховного торфа и биогумуса на основе остаточного активного ила в соотношениях, подобранных и исследованных по водно-физическим свойствам ранее [20] в следующих вариантах, приготовленных по объему используемых фракций в количествах: контроль, полностью состоящий из торфа; 90 % торфа с добавкой 10 % ила, 80 % торфа с добавкой 20 % ила т.д. Всего 8 вариантов с градацией ила 10 %.

В качестве тест-объекта использовался овес посевной, который чувствителен к химическим и физико-химическим показателям почвы, что делает его хорошим индикатором состояния субстрата. Благодаря короткому циклу роста и развития овса возможно быстро определить изменения в почвенных условиях. Это особенно

важно для мониторинга изменений в почвенном состоянии на небольших участках или при частых исследованиях.

Каждая композиция субстрата рассматривалась в трехкратной повторности. Всего исследовали 24 образца. Семена овса высевали на глубину заделки 3–4 см в пластиковые контейнеры (объем 1,5 л, площадь поверхности грунта 0,02 м²). Предварительно определенная всхожесть по ГОСТ 12038-84 составила 74 %. Соответствуя такой всхожести, норма посева составила 17 семян на поверхность грунта. Растения выращивали с поддержанием постоянной влажности, которая составляла 60 % от влагоемкости субстратов в течение 20 дней. Количествен-

ные показатели прорастания, всхожести, биометрические и массовые данные обрабатывались общепринятыми статистическими методами в программах MS Excel и Statistica. Достоверность различий средних величин оценивалась по критериям Стьюдента, Краскела – Уоллиса и Манна – Уитни, нормальность распределений – по критериям Пирсона хи-квадрат и Колмогорова – Смирнова. Различия для всех приведенных данных по показателям считались значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлены средние количественные и биометрические показатели тест-культур при изучении фитотоксичности компонентов субстратов.

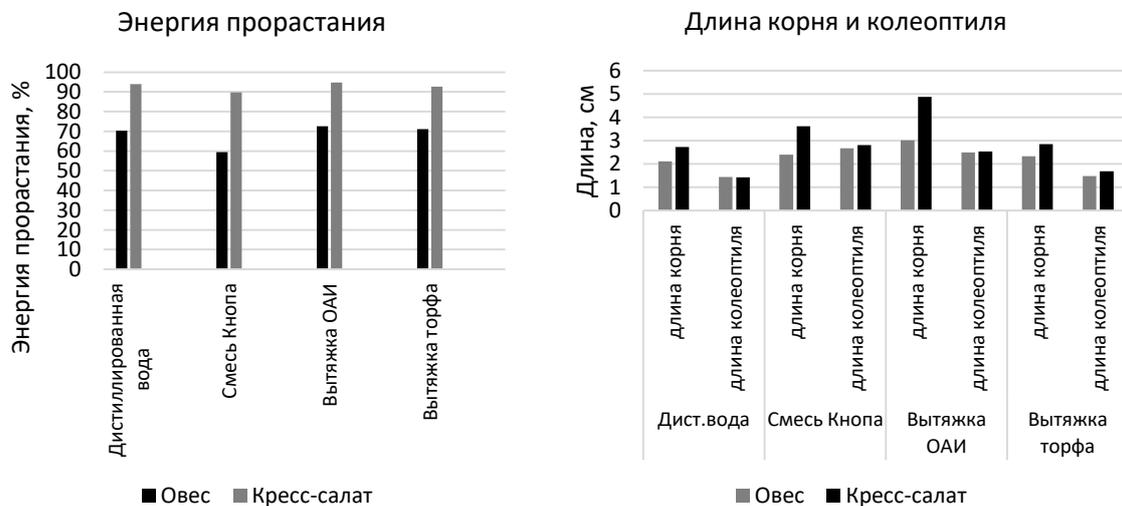


Рис. 1. Средние количественные показатели прорастания тест-культур (число исследуемых образцов $n = 100$)

Средняя энергия прорастания овса в вытяжках биогумуса на основе ОАИ составляет 72,5 %, что несколько выше, чем в торфяных вытяжках (63,3 %). Однако статистически значимой разницы в показателях энергии прорастания овса в используемых вытяжках и контроле не найдено ($p = 0,058$). Стимулирующих эффектов ОАИ и фитотоксичности по показателям энергии прорастания для овса не обнаружено ($p = 0,074$). Сравнение таких показателей, как длина корня и длина coleoptиля овса, показывает стимулирующее действие вытяжки на основе ОАИ. Этот показатель статистически превышает значения ($p = 0,00023$ для показателей длины корня и $p = 0,0047$ для показателей длины coleoptиля), полученные в контроле с водой, и сопоставим со значениями, полученными на смеси Кнопа.

Для кресс-салата средние значения энергии прорастания составляют 92 % и не показывают статистически значимой ($p = 0,061$) разницы в исследуемых вытяжках и контроле. Однако отмечается стимулирующее действие на рост кресс-салата вытяжки активного ила. Особенно активно это проявляется в увеличении длины корня ($p = 5,01 \cdot 10^{-9}$), где данный показатель значительно превышает длину корня в смеси Кнопа. Аналогично данным по овсу показатели растений в вытяжке торфа сопоставимы с данными по воде.

Таким образом, вытяжка на основе обезвоженного активного ила очистных сооружений Архангельского целлюлозно-бумажного комбината не оказывает угнетающего действия на прорастание тест-объектов – семян овса и кресс-салата, а согласно показателям длины корня и

колеоптиля овса, оказывает стимулирующее действие, сопоставимое или превышающее действие смеси Кнопа. Фитостимулирующего эффекта вытяжки торфа не обнаружено.

Результаты вегетационного опыта по испытанию субстратов с разным соотношением торфа и ОАИ представлены в таблице 2.

Таблица 2

Всхожесть и биометрические показатели овса на различных композициях субстратов на основе торфа и ОАИ

Содержание биогумуса на основе ОАИ, %	Всхожесть, %	Длина стебля, см	Длина корня, см
0	72,5	8,5±1,0	1,4±0,3
10	74,5	19,8±4,8	10,1±3,1
20	76,5	18,2±2,6	11,1±1,1
30	84,3	17,5±0,8	8,7±2,8
40	90,2	17,5±1,2	7,2±2,6
50	72,5	18,2±1,4	7,8±1,7
60	90,2	18,4±1,7	7,6±0,9
70	82,4	18,1±2,8	8,9±7,4

В контрольных образцах на торфе растения были ослаблены и к концу эксперимента пожелтели (рис. 2, слева), что не позволяет говорить о

применении чистого верхового торфа при выращивании культур.



Рис. 2. Овес посевной, выращенный без добавления ОАИ (слева) и с 70 % ОАИ (справа)

Общая всхожесть семян овса в вариантах без добавления остаточного активного ила составляет 72,5 %, с добавлением остаточного активного ила – 72,5–90,2 % (среднее 81,5 ± 2,7). Дисперсионный анализ показал, что добавление ОАИ в субстрат оказывает влияние на всхожесть семян ($F = 9, P = 0,009, F_{крит. 0,05} = 4,6$), на длину стебля ($F = 47, P = 0,0007, F_{крит. 0,05} = 4,6$), на длину корня ($F = 39, P = 0,0002, F_{крит. 0,05} = 4,6$). Подобные выводы сделаны и с применением

непараметрических критериев Манна –Уитни и Краскела – Уоллиса – различия групп с добавлением ОАИ и без добавления значимы на уровне $p < 0,05$ для всех исследуемых параметров – всхожесть, длина стебля, длина корня.

Средняя длина стебля овса в вариантах без добавления ОАИ составила 8,5 см, что достоверно ниже образцов с добавлением ОАИ (среднее 18,2 ± 0,29 см). Статистически доказано, что добавка ОАИ даже в количестве 10 %

приводит к увеличению длины стебля более чем в два раза по сравнению с контрольным образцом – торфом (критерий Стьюдента = 7,5). Между вариантами с добавлением ОАИ достоверного различия не наблюдается (величина критерия Стьюдента находится в пределах 0,1–0,8 при стандартных значениях 2,4–3,7).

Средняя длина корня в контрольном образце без добавления ОАИ составляет 1,4 см. Статистически доказано, что добавка ОАИ в субстрат

приводит к увеличению длины корня более чем в 6 раз. Максимальные значения наблюдаются при добавлении 10–20 % ОАИ к торфу. Среднее значение для различных вариантов добавления ОАИ составило $8,7 \pm 0,53$ см.

Также было произведено измерение биомассы надземной и подземной части растений после их предварительного высушивания при температуре 105 °С (рис. 3).

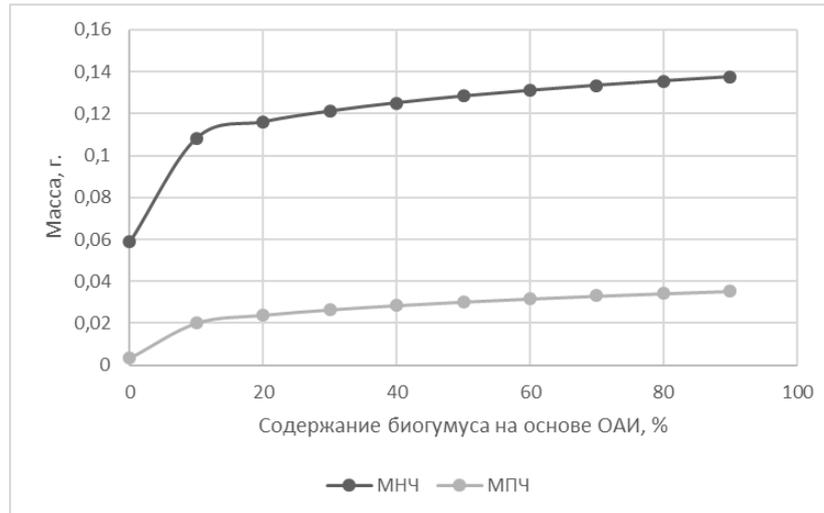


Рис. 3. Массовые показатели овса (в пересчете на одно растение)

Связь массы надземной и подземной части выражается уравнениями

$$\begin{aligned} \text{МНЧ} &= 0,05869 + 0,0305 \cdot \text{ОАИ}^{0,2111}; & R^2 &= 0,73 \\ \text{МПЧ} &= 0,00343 + 0,00855 \cdot \text{ОАИ}^{0,2928}; & R^2 &= 0,68, \end{aligned}$$

где МНЧ – масса надземной части, г; МПЧ – масса подземной части, г.

Распределение полученных значений массы надземной и подземной части оценивается как нормальное. Критерий Колмогорова – Смирнова составил 0,11 при стандартном значении 1,36, критерий Пирсона хи-квадрат – 21 при стандартном значении 33,9.

Добавка компостированного остаточного активного ила в верховой торф при приготовлении субстратов положительно влияет на показатели роста овса посевной. Увеличивается длина стебля и корня, масса подземной и надземной частей растений. Оптимальным в субстрате для выращивания овса является добавка биогадуса на основе ОАИ в количестве 10–20 %. Это согласуется с данными других авторов: внесение добавок ОАИ в небольших дозах улучшает

свойства дерново-подзолистых почв и рост сеянцев сосны и ели в теплицах.

Заключение. Таким образом, активный ил в виде биогадуса при добавке к верховому торфу не обладает фитотоксичностью по отношению к тест-объектам (кресс-салат и овес посевной). В добавках 10–20 % к верховому торфу ОАИ повышает ростовые показатели тест объекта (овса посевной), что важно для стандартизации полученного посадочного материала по высоте. При больших долях добавки биогадуса (более 40 %) прирост овса замедляется, но масса стеблей и корней увеличивается. На стабильность роста и развития растений может влиять качество перемешивания компонентов субстрата, имеющих различную плотность, что необходимо предусматривать при использовании в тепличном хозяйстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mechanization of soil preparation for greenhouses / *P.I. Pavlov* [et al.] // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. № 3 (9). P.1023–1030.
2. *Shiliu C.* Research and application of peat in agriculture // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. P. 384
3. *Haile A., Gelebo G.G., Tesfaye T.* Pulp and paper mill wastes: utilizations and prospects for high value-added biomaterials // *Bioresour. Bioprocess.* 2021. 8. 35 p.
4. *Ручкина О.И., Зверева А.Н.* Методы утилизации осадков городских очистных сооружений // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2020. Т. 1. С. 192–196.
5. Reuse of water and sludge in agriculture: new technologies for the treatment / *S.C. Fernandes* [et al.] // *Research, Society and Development*. 2023. 12. e30012128262. DOI: 10.33448/rsd-v12i1.28262.
6. Waste to resource: use of water treatment residual for increased maize productivity and micronutrient content / *T. Gwandu* [et al.] // *Environ Geochem Health* 2021. 44. DOI: 10.1007/s10653-021-01100-z.
7. Improvement of Thermal Dehydration and Agronomic Properties of Products Obtained by Combining Sewage Sludge with Industrial Residues / *A. Santos* [et al.] // *Waste and Biomass Valorization*. 2021. 12. 1-11. DOI: 10.1007/s12649-021-01371-8.
8. Thermal dehydration of urban biosolids with green liquor dregs from pulp and paper mill / *L. Gomes* [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2020. 261. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109944.
9. Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters / *H. Hamdi* [et al.] // *Catena*. 2018. 172. 11-20. DOI: 10.1016/j.catena.2018.08.015.
10. Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production / *M.M. Gabira* [et al.] // *iForest*. 2021. 14. P. 569–575.
11. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications / *K. Usman* [et al.] // *American Journal of Plant Sciences*. 2012. V. 03. P. 1708–1721.
12. *Наквасина Е.Н., Коптев С.В., Никитина М.В.* Субстраты на основе торфа и компостируемого активного ила Архангельского целлюлозно-бумажного комбината для выращивания посадочного материала хвойных пород // *Лесной вестник*. 2024. Т. 28, № 3. С. 67–77.
13. Опыт разработки и использования контейнерных субстратов для лесных питомников. Альтернативы торфу / *Е.Д. Робонен* [и др.] // *Resources and Technology*. 2015. 12 (1). С. 47–76.
14. Better together: Water treatment residual and poor-quality compost improves sandy soil fertility / *C.E. Clarke* [et al.] // *Journal of Environmental Quality*. 2019. 48(6), P. 1781–1788.
15. Effects of sewage sludge fertilizer on heavy metal accumulation and consequent responses of sunflower (*Helianthus annuus*) / *D. Belhaj* [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. 23. DOI: 10.1007/s11356-016-7193-0.
16. Analysis of potentially toxic metal constraints to apply sewage sludge in Portuguese agricultural soils / *L. Gomes* [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. 26. DOI: 10.1007/s11356-019-05796-6.
17. Effect of sludge amelioration on yield, accumulation and translocation of heavy metals in soybean grown in acid and alkaline soils / *M. Choudhary* [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. 30. DOI: 10.1007/s11356-023-29568-5.
18. *Jalali M., Imanifard A., Jalali M.* Heavy metals accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and shoots grown in calcareous soils treated with non-spiked and spiked sewage sludge // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. 30. 1-12. DOI: 10.1007/s11356-022-23604-6.
19. *Yakameran E., Ari A., Aygun A.* Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals // *Journal of Cleaner Production*. 2021. 319. 128568. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128568.
20. Водно-физические свойства субстратов на основе торфа и компостируемых отходов активного ила Архангельского целлюлозно-бумажного комбината / *Е.Н. Наквасина* [и др.] // *Успехи современного естествознания*. 2023. № 2. С. 13–17.

References

1. Mechanization of soil preparation for greenhouses / *P.I. Pavlov* [et al.] // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. № 3 (9). P.1023–1030.
2. *Shiliu C.* Research and application of peat in agriculture // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. P. 384
3. *Haile A., Gelebo G.G., Tesfaye T.* Pulp and paper mill wastes: utilizations and prospects for high value-added biomaterials // Bioresour. Bioprocess. 2021. 8. 35 p.
4. *Ruchkinova O.I., Zvereva A.N.* Metody utilizatsii osadkov gorodskih ochestnykh soruzhenij // Sovremennye tehnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika. 2020. T. 1. S. 192–196.
5. Reuse of water and sludge in agriculture: new technologies for the treatment / *S.C. Fernandes* [et al.] // Research, Society and Development. 2023. 12. e30012128262. DOI: 10.33448/rsd-v12i1.28262.
6. Waste to resource: use of water treatment residual for increased maize productivity and micronutrient content / *T. Gwandu* [et al.] // Environ Geochem Health 2021. 44. DOI: 10.1007/s10653-021-01100-z.
7. Improvement of Thermal Dehydration and Agronomic Properties of Products Obtained by Combining Sewage Sludge with Industrial Residues / *A. Santos* [et al.] // Waste and Biomass Valorization. 2021. 12. 1-11. DOI: 10.1007/s12649-021-01371-8.
8. Thermal dehydration of urban biosolids with green liquor dregs from pulp and paper mill / *L. Gomes* [et al.] // Journal of Environmental Management. 2020. 261. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109944.
9. Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters / *H. Hamdi* [et al.] // Catena. 2018. 172. 11-20. DOI: 10.1016/j.catena.2018.08.015.
10. Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production / *M.M. Gabira* [et al.] // iForest. 2021. 14. P. 569–575.
11. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications / *K. Usman* [et al.] // American Journal of Plant Sciences. 2012. V. 03. P. 1708–1721.
12. *Nakvasina E.N., Koptev S.V., Nikitina M.V.* Substraty na osnove torfa i kompostirovanogo aktivnogo ila Arhangel'skogo cellyulozno-bumazhnogo kombinata dlya vyraschivaniya posadochnogo materiala hvoynykh porod // Lesnoj vestnik. 2024. T. 28, № 3. S. 67–77.
13. Opyt razrabotki i ispol'zovaniya kontejnerykh substratov dlya lesnykh pitomnikov. Al'ternativy torfu / *E.D. Pobonen* [i dr.] // Resources and Technology. 2015. 12 (1). S. 47–76.
14. Better together: Water treatment residual and poor-quality compost improves sandy soil fertility / *C.E. Clarke* [et al.] // Journal of Environmental Quality. 2019. 48(6), P. 1781–1788.
15. Effects of sewage sludge fertilizer on heavy metal accumulation and consequent responses of sunflower (*Helianthus annuus*) / *D. Belhaj* [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2016. 23. DOI: 10.1007/s11356-016-7193-0.
16. Analysis of potentially toxic metal constraints to apply sewage sludge in Portuguese agricultural soils / *L. Gomes* [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2019. 26. DOI: 10.1007/s11356-019-05796-6.
17. Effect of sludge amelioration on yield, accumulation and translocation of heavy metals in soybean grown in acid and alkaline soils / *M. Choudhary* [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2023. 30. DOI: 10.1007/s11356-023-29568-5.
18. *Jalali M., Imanifard A., Jalali M.* Heavy metals accumulation in wheat (*Triticum aestivum* L.) roots and shoots grown in calcareous soils treated with non-spiked and spiked sewage sludge // Environmental Science and Pollution Research. 2022. 30. 1-12. DOI: 10.1007/s11356-022-23604-6.
19. *Yakamercan E., Ari A., Aygun A.* Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals // Journal of Cleaner Production. 2021. 319. 128568. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128568.
20. Vodno-fizicheskie svoystva substratov na osnove torfa i kompostirovannykh othodov aktivnogo ila Arhangel'skogo cellyulozno-bumazhnogo kombinata / *E.N. Nakvasina* [i dr.] // Uspehi sovremennogo estestvoznaniya. 2023. № 2. S. 13–17.

Статья принята к публикации 29.01.2024 / The article accepted for publication 29.01.2024.

Информация об авторах:

Мария Викторовна Никитина¹, доцент кафедры теоретической и прикладной химии, кандидат химических наук, доцент

Елена Николаевна Наквасина², профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Сергей Викторович Коптев³, заведующий кафедрой лесоводства и лесоустройства, доктор сельскохозяйственных наук, доцент

Information about the authors:

Maria Viktorovna Nikitina¹, Associate Professor at the Department of Theoretical and Applied Chemistry, Candidate of Chemical Sciences, Docent

Elena Nikolaevna Nakvasina², Professor at the Department of Forestry and Forestry, Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Сергей Викторович Коптев³, Head of the Department of Forestry and Forestry, Doctor of Agricultural Sciences, Docent

