

Научная статья

УДК 631.45:631.87

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-510-515>

CC BY 4.0

Оценка содержания тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава при внесении активного ила как основы наноудобрения (отход целлюлозно-бумажной промышленности)

Мария Геннадьевна Юркевич^{1*} , Руслан Римович Сулейманов^{2,3} , Екатерина Сергеевна Дорогая³ ,
Аркадий Андреевич Курбатов¹ 

¹ Институт биологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

² Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

³ Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: svirinka@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. На предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности одним из видов отходов производства является активный ил. В рамках рационального использования природных ресурсов и вторичного использования отходов благодаря своему составу активный ил при определенных технологических решениях возможно использовать для производства наноудобрений, поскольку он уже является основой для создания различных почвогрунтов и биопрепаратов. Однако иногда в составе активного ила могут содержаться токсичные соединения, тяжелые металлы, которые могут оказать отрицательное влияние на плодородие почвы и жизненное состояние растений, в связи с чем целью наших исследований явилось изучение влияния внесения активного ила в качестве основы наноудобрения на содержание тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава, находящейся в сельскохозяйственном использовании. **Методы и материалы.** Исследования проводились в условиях модельного опыта в вегетационных сосудах. Использовали подзолистую почву различного гранулометрического состава (глинистую, суглинистую, песчаную) и отход целлюлозно-бумажной промышленности – активный ил в концентрациях 1; 2,5; 5 и 10% от веса сухой почвы. Определение валового содержания тяжелых металлов проводили атомно-абсорбционным методом с измерением на спектрофотометре AA-7000 (Shimadzu, Япония), подвижных форм – с использованием ацетатно-аммонийного буферного раствора методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. **Результаты и обсуждение.** В работе приводятся результаты исследований по изучению изменения подвижных и валовых форм тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава при внесении активного ила в качестве основы органического наноудобрения в условиях модельного опыта. **Заключение.** Показано, что содержание подвижных и валовых форм изученных металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Ti, Al, Ni, Co, Cr, Cd и Mo) находилось в пределах принятых санитарно-гигиенических нормативов, за исключением валовой формы Cd, где максимальное превышение составило 2,5 ПДК.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подзолистая почва, активный ил, наноудобрение, тяжелые металлы, отходы целлюлозно-бумажной промышленности.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 22-16-00145.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Юркевич М.Г., Сулейманов Р.Р., Дорогая Е.С., Курбатов А.А. Оценка содержания тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава при внесении активного ила как основы наноудобрения (отход целлюлозно-бумажной промышленности) // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т.14, № 6. С. 510–515. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-510-515>. – EDN: UZGYLB.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в составе лесопромышленного комплекса России целлюлозно-бумажная

промышленность занимает ведущее место, при этом потребляет 18% заготовленного древесного сырья, а доля ее продукции в составе товарной продукции лесного комплекса составляет 42,0% [1]. В то же

© Юркевич М.Г., Сулейманов Р.Р., Дорогая Е.С., Курбатов А.А., 2022

время функционирования данной промышленности сопровождается образованием различных отходов, а также выбросами и сбросами загрязняющих веществ в окружающую среду. Загрязнение природы целлюлозно-бумажными предприятиями влияет на промышленность, сельское, лесное, рыбное и жилищно-коммунальное хозяйство, а также здоровье населения.

Ситуацию, сложившуюся с обращением с отходами, можно определить как критическую. Ежегодно в России образуется до 7 млрд. т отходов, и лишь 2 из них используются как вторичное сырье, при этом отходы целлюлозно-бумажной промышленности составляют 15% [2]. Одним из видов отходов является активный ил, формирование которого происходит в результате биологической очистки промышленных стоков на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности, который, как правило, складывается в отстойниках. В состав активного ила входят микроорганизмы, минеральные частицы, органические остатки, белки, азот и фосфор [3, 4].

В то же время в мировой практике ведения сельского хозяйства накопилось определенное количество проблем, вызванных ростом численности населения, изменением климата, деградацией почвенного покрова, снижением урожайности сельскохозяйственных культур, использованием синтетических удобрений, усложняющих ситуацию. Для решения данных проблем предлагается применение нанотехнологий, направленных на поддержание устойчивого сельского хозяйства путем производства удобрений по индивидуальному заказу с запланированными свойствами. Применение нанотехнологий в виде наноудобрений представляет собой инновационную, эффективную и экологически чистую альтернативу синтетическим удобрениям. Такие удобрения используются для улучшения питания растений, повышения эффективности использования питательных веществ, а также улучшения микробиома и плодородия почвы [5–7].

Механизм работы наноудобрений основан на том, что питательные вещества, применяемые отдельно или в комбинации, связываются с наноразмерными адсорбентами, которые высвобождают питательные вещества очень медленно по сравнению с обычными удобрениями [8, 9]. Основными составляющими компонентами таких удобрений могут быть водоросли [10, 11], биоуголь [12, 13], остатки биомассы растений [14, 15], биополимеры [16], остатки сточных вод, однако к их использованию необходимо подходить с осторожностью, поскольку они могут содержать высокие концентрации тяжелых металлов [17–19].

В рамках рационального использования природных ресурсов и вторичного использования от-

ходов благодаря своему составу активный ил при определенных технологических решениях возможно использовать для производства наноудобрений, поскольку он уже является основой для создания различных почвогрунтов и биопрепаратов [20–22]. Однако иногда в составе активного ила могут содержаться токсичные соединения, тяжелые металлы, патогены, которые могут оказать отрицательное влияние на плодородие почвы и жизненное состояние растений [23, 24]. В связи с чем **целью наших исследований** явилось изучение влияния внесения активного ила в качестве удобрения на содержание тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава, находящейся в сельскохозяйственном использовании.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследования проводились в условиях модельного опыта в вегетационных сосудах. Предварительно высушенный до воздушно-сухого состояния гумусово-аккумулятивный горизонт пахотной подзолистой почвы различного гранулометрического состава (глинистый, суглинистый, песчаный) просеяли через сито диаметром 1 мм, далее в дозах 1; 2,5; 5 и 10% от веса сухой почвы (1 кг) вносили отход целлюлозно-бумажной промышленности – активный ил – и тщательно перемешивали. После почву увлажняли до уровня 70% от полной влагоемкости и инкубировали при постоянной температуре (23°C) и периодическом перемешивании в течение 90 суток. Отбор проб на определение валовых и подвижных форм тяжелых металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Ti, Al, Ni, Co, Cr, Pb, Cd, Mo) был проведен по завершении инкубации.

Определение валового содержания тяжелых металлов проводили атомно-абсорбционным методом с измерением на спектрофотометре AA-7000 (Shimadzu, Япония), подвижных форм – с использованием ацетатно-аммонийного буферного раствора методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [25].

Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве приводятся согласно Постановлению... (2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности природно-климатических условий Республики Карелия способствовали формированию большого разнообразия почв, среди которых преобладают примитивные слаборазвитые, подзолистые, дерновые, болотные и аллювиальные. Подзолистые почвы являются наиболее распространенными,

и, в свою очередь, они подразделяются на две группы в зависимости от гранулометрического состава: сформировавшиеся на песках, супесях и на суглинках, глинах. В целом подзолистые почвы характеризуются кислой реакцией среды и низким естественным плодородием, но, несмотря на это, активно используются под пашню. Распахивание и окультуривание подзолистых почв в первую очередь приводит к резкому снижению содержания органического вещества. Происходит вынос с урожаем и вымывание в нижележащие горизонты элементов минерального питания растений (азота, подвижных форм фосфора и калия), что приводит к необходимости их регулярного внесения в почву в виде удобрений. В качестве альтернативных источников органических и минеральных удобрений в регионе используется навоз крупного рогатого скота, а в последнее время рассматриваются варианты применения отходов деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной

промышленности, одним из которых и является активный ил [23].

Анализ содержания валовых форм тяжелых металлов (Fe, Mn, Cu, Zn, Ti, Al, Ni, Co, Cr, Pb, Mo) по всем вариантам опыта в подзолистой почве различного гранулометрического состава (глинистый, суглинистый, песчаный) и различных дозах внесения активного ила показал, что существенного увеличения, а также превышения предельно или ориентировочно допустимых концентраций не произошло. Исключение составило только содержание Cd, относящееся к первому классу опасности, где итоговая концентрация по всем вариантам превышало ПДК с максимальным значением в 2,5 раза (табл. 1). Повышение содержания Cd во всех вариантах опыта зависело от дозы внесения активного ила, при этом коэффициент корреляции составил для глинистой подзолистой почвы – 0,6; для суглинистой – 0,9 и для песчаной – 0,6. Однако следует отметить, что

Таблица 1

Изменение содержания валовых форм тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава

Варианты опыта	Fe	Mn	Cu	Zn	Ti	Al	Ni	Co	Cr	Pb	Cd	Mo
	мг/кг почвы											
Подзолисто-глинистая почва (ПГП) / Podzolic-claysoil												
ПГП (фон)	837	23,3	0,9	25,1	17,9	655	3,17	0,87	2,06	11,44	0,59	0,22
ПГП + 1% АИ*	832	18,5	2,4	22,4	14,7	616	4,44	0,86	3,49	11,70	1,09	0,45
ПГП + 2,5% АИ	820	22,6	0,7	27,5	18,8	638	4,43	0,83	2,87	13,27	1,17	0,21
ПГП + 5% АИ	870	20,5	0,6	25,9	14,3	680	3,31	0,87	2,13	10,18	1,11	0,23
ПГП + 10% АИ	860	23,1	2,3	29,4	16,3	641	3,23	0,91	2,13	13,45	1,18	0,23
Подзолисто-суглинистая почва (ПСП) / Podzolic-loamysoil												
ПСП (фон)	3799	42,9	3,9	6,6	404,0	2823	2,39	1,56	6,11	0,61	0,42	0,06
ПСП + 1% АИ	3691	40,6	3,6	6,0	539,1	2629	3,26	5,52	5,67	0,19	1,49	0,06
ПСП + 2,5% АИ	3609	38,1	3,1	3,4	387,9	2446	3,58	3,01	5,60	0,83	1,57	0,02
ПСП + 5% АИ	3913	40,6	3,4	6,2	512,7	2586	3,13	2,77	6,15	0,94	1,68	0,09
ПСП + 10% АИ	4018	46,1	3,4	6,6	619,3	3164	3,22	3,05	6,19	0,87	2,57	0,07
Подзолисто-песчаная почва (ППП) / Podzolic-sandysoil												
ППП (фон)	19903	416,5	6,9	33,3	687,4	7533	8,22	4,25	15,13	9,77	0,80	0,36
ППП + 1% АИ	23838	433,7	6,7	33,1	835,0	8754	8,36	4,45	15,33	11,06	1,01	0,36
ППП + 2,5% АИ	21308	462,1	7,6	37,8	994,3	8814	7,54	4,87	17,04	11,61	1,83	0,20
ППП + 5% АИ	21845	476,0	6,9	34,4	710,8	8942	7,89	3,83	19,53	9,78	1,93	0,16
ППП + 10% АИ	20606	442,1	6,9	34,2	836,2	8747	7,69	4,03	16,54	10,24	1,62	0,29
ПДК*/ОДК*	–	1000	66,0	110,0	–	–	40,0	–	–	65,0	1,0	–

Примечания: АИ – активный ил, ПДК – предельно допустимая концентрация, ОДК – ориентировочно допустимая концентрация

Таблица 2

Изменение содержания подвижных форм тяжелых металлов в подзолистой почве различного гранулометрического состава

Варианты опыта	Fe	Mn	Cu	Zn	Ti	Al	Ni	Co	Cr	Pb	Cd	Mo
	мг/кг почвы											
Подзолисто-глинистая почва (ПГП) / Podzolic-clay soil												
ПГП (фон)	20	11,4	0,3	24,0	0,4	63	0,99	0,55	0,16	5,07	0,40	0,004
ПГП + 1% АИ	19	7,7	0,2	20,4	0,2	61	1,35	0,45	0,26	6,90	0,09	0,001
ПГП + 2,5% АИ	17	8,9	0,1	23,1	0,1	61	1,39	0,68	0,40	7,23	0,11	0,001
ПГП + 5% АИ	23	8,2	0,3	23,4	0,1	56	1,17	0,65	0,21	5,04	0,10	0,001
ПГП + 10% АИ	24	16,0	0,1	23,4	0,1	67	2,26	0,73	0,33	6,05	0,11	0,002
Подзолисто-суглинистая почва (ПСП) / Podzolic-loamysoil												
ПСП (фон)	3	1,1	0,1	0,3	1,80	10	0,04	0,03	0,03	0,04	0,01	0,001
ПСП + 1% АИ	3	1,1	0,1	0,3	0,02	10	0,04	0,03	0,03	0,03	0,001	0,001
ПСП + 2,5% АИ	3	1,3	0,1	0,4	0,01	12	0,05	0,04	0,03	0,04	0,005	0,001
ПСП + 5% АИ	3	1,9	0,1	0,4	0,02	11	0,04	0,05	0,03	0,04	0,004	0,002
ПСП + 10% АИ	4	1,5	0,1	0,6	0,10	14	0,07	0,03	0,04	0,09	0,001	0,001
Подзолисто-песчаная почва (ППП) / Podzolic-sandysoil												
ППП (фон)	103	38,2	0,1	2,2	0,001	22	0,13	0,18	0,12	0,38	0,01	0,002
ППП + 1% АИ	41	16,8	0,05	0,7	<0,0001	18	0,10	0,10	0,09	0,08	0,002	0,001
ППП + 2,5% АИ	68	22,3	0,1	3,3	<0,0001	20	0,14	0,12	0,08	0,10	0,003	0,002
ППП + 5% АИ	82	21,6	0,03	2,1	<0,0001	24	0,17	0,12	0,10	0,12	0,002	0,001
ППП + 10% АИ	39	16,2	0,03	1,1	<0,0001	18	0,11	0,08	0,08	0,06	0,002	0,002
ПДК*/ОДК*	–	80,0	3,0	23,0	–	–	4,0	5,0	6,0	6,0	–	–

Примечания: АИ – активный ил, ПДК – предельно допустимая концентрация, ОДК – ориентировочно допустимая концентрация/
AI – activesludge, MPC – maximumpermissibleconcentration, UEC – approximatelypermissibleconcentration

содержания Cd в фоновых почвах изначально были приближены к ПДК (от 0,4 до 0,8), и в то же время наличие определенного количества этого металла в активном иле привело к проявлению «суммарного эффекта».

Анализ подвижных форм изученных металлов показал, что во всех вариантах опыта их концентрация была значительно ниже ПДК и ОДК, однако при этом отмечается разнонаправленная динамика повышения или снижения их содержания (табл. 2). Так, например, в подзолисто-песчаной почве произошло значительное снижение содержания подвижных форм Fe, Mn, Ti, Pb и Cd; в подзолисто-суглинистой почве – Ti и Cd; в подзолисто-глинистой почве – Ti, Cd и Mo, но при этом произошло увеличение – Ni и Cr, в то же время следует отметить, что в некоторых случаях корреляционные связи между концентрацией изученных металлов и дозой внесения активного ила отсутствовали. Такая разнонаправленность скорее всего объясняется тем, что на подвижность тяжелых металлов в почве оказывает влияние множество факторов, это содержание органического вещества,

кислотность среды, гранулометрический состав и химические свойства каждого элемента в отдельности и способности его вступать в различные соединения [26, 27], поэтому более подробный анализ динамики подвижности тяжелых металлов необходимо проводить с учетом этих показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования в модельном эксперименте по изучению содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов при внесении активного ила как отхода целлюлозно-бумажной промышленности в подзолистую почву различного гранулометрического состава (глинистый, суглинистый, песчаный) показали, что среди валовых форм содержание Fe, Mn, Cu, Zn, Ti, Al, Ni, Co, Cr, и Mo было ниже ПДК, а содержание Cd превышало принятые значения санитарно-гигиенических нормативов. Значения подвижных форм изученных металлов при разнонаправленной динамике их содержания оставались в пределах нормы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кожемяко Н.П. Состояние развития и концентрация производства целлюлозно-бумажной промышленности Российской Федерации // Лесной Вестник. 2008. № 4. С. 124–129.
2. Богданов А.В., Шатрова А.С., Качор О.Л. Разработка экологически безопасной технологии утилизации отходов ОАО «Байкальский ЦБК» // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 2. С. 47–53.
3. Левандовская Т.В., Чупакова А.В. Агрохимические свойства отходов очистных сооружений Соломбальского и Архангельского ЦБК // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные и точные науки. 2005. № 2. С. 112–115.
4. Согрина Ю.В., Соловьева А.С., Сакаева Э.Х. Оценка микробного состава активного ила биологических очистных сооружений целлюлозно-бумажного предприятия // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2018. Т.1. С. 100–103.
5. Toksha B., Sonawale V., Vanarase A., Bornare D., Tonde S., Hazra C., Kundu D., Satdive A., Tayde S., Chatterjee A. Nano fertilizers: A review on synthesis and impact of their use on crop yield and environment. *Environmental Technology & Innovation*. 2021; 24:101986. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101986>.
6. Kalwani M., Chakdar H., Srivastava A., Pabbi S., Shukla P. Effects of nano fertilizers on soil and plant-associated microbial communities: Emerging trends and perspectives. *Chemosphere*. 2022; 287 (2): 132107. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132107>.
7. Babu S., Singh R., Yadav D., Rathore S., Raj R., Avasthe R., Yadav S., Das A., Yadav V., Yadav B., Shekhawat K., Upadhyay P.K., Yadav D. K., Singh V. K., Nanofertilizers for agricultural and environmental sustainability. *Chemosphere*. 2022; 292: 133451. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133451>.
8. Chen J., Lü S., Zhang Z., Zhao X., Li X., Ning P., Liu M. Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. *Science of The Total Environment*. 2018; 613–614: 829. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.186>.
9. Zulfiqar F., Navarro M., Ashraf M., Akram N. A., Munné-Bosch S., Nano fertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science*. 2019; 289: 110270. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>.
10. Mahapatra D. M., Satapathy K. C., Panda B., Biofertilizers and nanofertilizers for sustainable agriculture: Phycopropects and challenges. *Science of The Total Environment*. 2022; 803: 149990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149990>.
11. Yurkevich, M.; Suleymanov, R.; Ikkonen, E.; Dorogaya, E.; Bakhmet, O. Effect of Brown Algae (*Fucus vesiculosus* L.) on humus and chemical properties of soils of different type and postgermination Growth of Cucumber Seedlings. *Agronomy* 2022; 12: 1991. <https://doi.org/10.3390/agronomy12091991>.
12. Lateef A., Nazir R., Jamil N., Alam S., Shah R., Khan M. N., Saleem M., Shafiq-ur-Rehman. Synthesis and characterization of environmental friendly corncob biochar based nano-composite – A potential slow release nanofertilizer for sustainable agriculture. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2019; 11: 100212. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100212>.
13. Samoraj M., Mironiuk M., Witek-Krowiak A., Izydorczyk, DawidSkrzypczak G., Mikula K., Baśladyńska S., Moustakas K., Chojnacka K., Biochar in environmental friendly fertilizers - Prospects of development products and technologies. *Chemosphere*. 2022; 296: 133975. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133975>.
14. Izydorczyk G., Sienkiewicz-Cholewa U., Baśladyńska S., Kocek D., Mironiuk M., Chojnacka K., New environmentally friendly bio-based micronutrient fertilizer by biosorption: From laboratory studies to the field. *Science of The Total Environment*. 2020; 710: 136061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136061>.
15. Cerri B. C., Borelli L. M., Stelutti I. M., Soares M. R., Altenhofen da Silva M., Evaluation of new environmental friendly particulate soil fertilizers based on agroindustry wastes biopolymers and sugarcane vinasse. *Waste Management*. 2020; 108: 144. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.038>.
16. Bouchtaoui F., Ablouh E., Mhada M., Kassem I., Salim M.H., Mouhib S., Kassab Z., Sehaqui H., Achaby M., Methylcellulose / lignin biocomposite as an eco-friendly and multifunctional coating material for slow-release fertilizers: Effect on nutrients management and wheat growth. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022; 221: 398–415. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.194>.
17. Hei L., Jin P., Zhu X., Ye W., Yang Y., Characteristics of Speciation of Heavy Metals in Municipal Sewage Sludge of Guangzhou as Fertilizer. *Procedia Environmental Sciences*. 2016; 31: 232. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.031>.

18. Kominko G., Gorazda K., Wzorek Z., Potentiality of sewage sludge-based organo-mineral fertilizer production in Poland considering nutrient value, heavy metal content and phytotoxicity for rapeseed crops. *Journal of Environmental Management*. 2019; 248: 109283. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109283>.

19. Kominko G., Gorazda K., Wzorek Z. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants. *Journal of Environmental Management*. 2022; 305: 114417. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114417>.

20. Климова Е.В. Перспективы переработки отходов целлюлозно-бумажной промышленности в органические удобрения // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. 2005. № 3. С. 623.

21. Киреева Н.А., Онегова Т.С., Григориади А.С. Характеристика Белвитамила, используемого для рекультивации нефтезагрязненных природных объектов // Вестник Башкирского университета. 2008. Т. 13. № 2. С. 279–281.

22. Богданов А.В., Шатрова А.С., Цырендылыкова Л.Б., Шкрабо А.И. Применение почвогрунта из отходов целлюлозно-бумажной промышленности для интенсификации рекультивационной сукцессии нарушенных земель // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 24–29.

23. Федоренко Н.Г., Бахмет О.Н. Органические удобрения из отходов деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности // Экология и промышленность России. 2008. № 4. С. 13–15.

24. Sharma P., Tripathi S., Chandra R. Phytoremediation potential of heavy metal accumulator plants for waste management in the pulp and paper industry // *Heliyon*. – 2020. – Vol. 6. – I. 9. e04559. – <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04559>.

25. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л.А. Воробьевой. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.

26. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Антоненко Е.М., Сушкова С.Н. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1304–1311.

27. Плеханова И.О. Степень самоочищения агродерново-подзолистых супесчаных почв, удобренных осадком сточных вод // Почвоведение. 2017. № 4. С. 506–512. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17040086>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юркевич Мария Геннадьевна – кандидат сельскохозяйственных наук, заведующая лаборатории экологии и географии почв, Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Карельского научного центра РАН (ИБ КарНЦ РАН), Петрозаводск, Россия, svirinka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0458-5734>

Сулейманов Руслан Римович – доктор биологических наук, профессор, Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, Петрозаводск, Уфа, Россия, soils@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7754-0406>

Дорогая Екатерина Сергеевна – аспирантка, Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-4553-1465>

Курбатов Аркадий Андреевич – аспирант, ведущий биолог, Институт биологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра Карельского научного центра РАН (ИБ КарНЦ РАН), Петрозаводск, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-0802-0164>

ВКЛАД АВТОРОВ

Юркевич М.Г. – общее руководство работой и проведение эксперимента.

Сулейманов Р.Р. – подготовка публикации.

Дорогая Е.С. – проведение химических анализов.

Курбатов А.А. – проведение химических анализов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.11.2022; одобрена после рецензирования 06.12.2022; принята к публикации 08.12.2022.