

## Агротехнологии и мелиорация земель Agricultural technologies and land reclamation

DOI 10.22363/2312-797X-2021-16-4-370-388

УДК 631.82:549.6: 504.062.4

Научная статья / Research article

### Модифицированные материалы на основе слоистых силикатов как мелиоранты для ремедиации подзола техногенной пустоши

Т.К. Иванова<sup>1</sup> , М.В. Слуковская<sup>1,2</sup>  , И.А. Мосендз<sup>1</sup> ,  
Е.А. Красавцева<sup>1</sup> , В.В. Максимова<sup>1</sup> , И.П. Канарейкина<sup>2</sup> ,  
А.А. Широкая<sup>1</sup> , И.П. Кременецкая<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Российская Федерация

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

 m.slukovskaya@ksc.ru

**Аннотация.** Слоистые силикаты, такие как серпентин и вермикулит, обладают свойствами, позволяющими использовать материалы на их основе в качестве компонентов природоохранных технологий. Исследована возможность ремедиации почвы техногенно загрязненной территории, образовавшейся вследствие длительного воздействия выбросов медно-никелевого производства (г. Мончегорск, Мурманская обл.). В качестве мелиорантов использовались термовермикулит и отработанный сорбент на основе гранулированного серпентина, который является отходом после использования в технологии очистки высококонцентрированных растворов от металлов. Данные материалы обладают высокой сорбционной активностью в отношении ряда металлов, развитой удельной поверхностью, способностью удерживать влагу и доступны в количествах, достаточных для проведения работ по ремедиации больших по площади территорий. Проведено исследование физико-химических свойств техногенно загрязненной почвы и мелиорантов, контактное фитотестирование подзола с добавлением термовермикулита и отработанного сорбента (тест-культуры — овес посевной *Avena sativa* L. и клевер луговой *Trifolium pratense* L.). Результаты исследования показали, что предложенные материалы являются эффективными добавками для повышения pH кислой почвы, сорбции и осаждения Al и потенциально токсичных металлов — Cu,

© Иванова Т.К., Слуковская М.В., Мосендз И.А., Красавцева Е.А., Максимова В.В., Канарейкина И.П., Широкая А.А., Кременецкая И.П., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/1>

Ni, Pb, Fe, а также для улучшения гидрофизических и агрохимических характеристик почвы. Отмечен положительный отклик тест-культур на внесение мелиорантов в техногенно загрязненную почву.

**Ключевые слова:** термовермикулит, серпентин, потенциально токсичные металлы, сорбция, основная гидрофизическая характеристика, фитотестирование

**Заявление о конфликте интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование. Благодарности.** Исследование выполнено при поддержке фонда Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (грант № МК-2697.2021.1.5). Получение отработанного сорбента выполнено в рамках Госзадания КНЦ РАН № 0226-2019-0011.

**История статьи:** поступила в редакцию 1 ноября 2021 г., принята к публикации 16 ноября 2021 г.

**Для цитирования:** Иванова Т.К., Слуковская М.В., Мосендз И.А., Красавцева Е.А., Максимова В.В., Канарейкина И.П., Широкая А.А., Кременецкая И.П. Модифицированные материалы на основе слоистых силикатов как мелиоранты для ремедиации подзола техногенной пустоши // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агронимия и животноводство. 2021. Т. 16. № 4. С. 370—388. doi: 10.22363/2312-797X-2021-16-4-370-388

## Modified materials based on layered minerals as ameliorants for the remediation of podzol in the industrial barren

Tatiana K. Ivanova<sup>1</sup> , Marina V. Slukovskaya<sup>1,2</sup>  , Irina A. Mosendz<sup>1</sup> ,  
Evgeniya A. Krasavtseva<sup>1</sup> , Victoria V. Maksimova<sup>1</sup> ,  
Inna P. Kanareykina<sup>2</sup> , Anna A. Shirokaya<sup>1</sup> , Irina P. Kremenetskaya<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, *Apatity, Russian Federation*

<sup>2</sup>RUDN University, *Moscow, Russian Federation*

 m.slukovskaya@ksc.ru

**Abstract.** Layered silicates, such as serpentine and vermiculite, have properties that make it possible to use materials based on them as components of environmental technologies. The possibility of soil remediation in industrially contaminated area, formed due to the long-term exposure to emissions from copper-nickel production (Monchegorsk, Murmansk region), was studied. Two materials were used as ameliorants in our study: expanded vermiculite and granular serpentine sorbent, a waste after using the purification technology of highly concentrated solutions from metals. These materials have a high sorption activity to several metals, a high specific surface area, the ability to retain moisture, and are available in quantities sufficient to work on the remediation of large areas. A study of the physicochemical properties of industrially polluted soil and ameliorants, direct phytotoxicity testing of podzol and its mixtures with expanded vermiculite and the serpentine sorbent (test plants — common oat *Avena sativa* L. and red clover *Trifolium pratense* L.) were carried out. The study results showed that the proposed materials were effective additives for increasing the pH of acidic soil, sorption and precipitation of Al and potentially toxic metals — Cu, Ni, Pb, Fe, and improving the soil hydrophysical and agrochemical characteristics. A positive response of test plants to the introduction of ameliorants into industrially contaminated soil was noted.

**Key words:** expanded vermiculite, serpentine, potentially toxic metals, sorption, water retention curve, phytotoxicity test

**Conflicts of interest.** The authors declared no conflicts of interest.

**Acknowledgments.** The study was supported by the Russian Federation President's Foundation for State Support of Young Russian Scientists (Grant No. МК-2697.2021.1.5). The waste sorbent was obtained within the framework of the State Assignment of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences No. 0226-2019-0011.

**Article history:** Received: 1 November 2021. Accepted: 16 November 2021.

**For citation:** Ivanova TK, Slukovskaya MV, Mosendz IA, Krasavtseva EA, Maksimova VV, Kanareykina IP, Shirokaya AA, Kremenetskaya IP. Modified materials based on layered minerals as ameliorants for the remediation of podzol in the industrial barren. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2021; 16(4):370–388. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-797X-2021-16-4-370-388

## Введение

Проблема деградации почв и образования техногенных ландшафтов имеет глобальный характер, что находит отражение в многочисленных работах по разработке подходов к рекультивации и ремедиации почв и техногенных поверхностных образований [1—3].

Территория техногенной пустоши вблизи г. Мончегорск (Кольский полуостров), образовавшаяся вследствие атмосферных выбросов медно-никелевого комбината, функционирующего с 1938 г., является одной из наиболее загрязненных территорий на Европейском Севере России [4]. Ее площадь в настоящее время составляет около 200 га, и запуск почвообразовательного процесса в обозримом будущем без вмешательства человека здесь практически невозможен [5].

Техногенная пустошь — экстремальная среда обитания, образовавшаяся вследствие атмосферных эмиссий и депонирования загрязняющих веществ предприятий цветной металлургии в наземных экосистемах [6—8]. Чрезвычайно высокие концентрации соединений потенциально токсичных металлов (ПТМ) в почве вызвали деградацию растительности, что привело к развитию водной и ветровой эрозии, а также истощению органического углерода в почвах [9, 10].

Глинистые минералы с большой удельной поверхностью и особой структурой кристаллического слоя позволяют иммобилизовать потенциально токсичные металлы путем адсорбции, координации и соосаждения [11, 12]. Глинистые минералы могут применяться в качестве сорбентов ПТМ и других загрязняющих веществ при восстановлении почвы, воды и других природных объектов [13, 14]. Вермикулит — минерал слоистого строения с разнообразными свойствами, одним из которых является способность вспучиваться и увеличиваться в объеме в 20...30 раз при нагревании [15]. Это вторичный минерал группы гидрослюд, являющийся пластинчатым материалом золотистого цвета. Химическая формула вермикулита —  $Mg_{0,5}(Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_{24} \times H_2O$ . Вермикулит характеризуется высокими значениями ЕКО (емкости катионного обмена) и развитой поверхностью, которая увеличивается при термообработке. Помимо улучшения физико-химических параметров произрастания растений, термовермикулит способствует детоксикации

почвенных растворов в результате проявления им ионообменных и сорбционных свойств [16—18].

Минералы серпентиновой группы, особенно термически активированные, обладают высокими кислотонейтрализующими и сорбционными свойствами по отношению к ПТМ и могут применяться для очистки водных и почвенных объектов [19—22]. Кроме того, серпентин имеет относительно высокую удельную поверхность, пористость, запас макроэлементов и другие благоприятные свойства, а также имеется в большом количестве в виде вскрышных пород различных месторождений.

Проведены работы по термоактивации, последующему гранулированию серпентинсодержащих материалов и их использованию для очистки высококонцентрированных растворов ПТМ и АІ [18, 23—25]. Отработанный сорбент является нетоксичным сорбционно-активным материалом и, в отличие от исходного материала, не обладает избыточной щелочностью, что позволяет использовать его для ремедиации техногенно загрязненного подзола.

**Цель исследования** — определить физико-химические характеристики почвосмесей, состоящих из термовермикулита, отработанного серпентинового сорбента и почвы с высоким содержанием металлов, и выявить оптимальные соотношения между почвой и мелиорантами для проведения работ по фиторемедиации.

## Материалы и методы исследования

**Объекты исследования** — смеси, состоящие из деградированного подзола Р, термовермикулита V и отработанного серпентинового сорбента S в разных соотношениях (рис. 1).



**Рис. 1.** Внешний вид объектов исследования: а — общий вид; б — отработанный серпентиновый сорбент; в — термовермикулит (фр. 0,45...2,00 мм); г — подзол (фр. < 2,0 мм)

**Fig. 1.** Appearance of the research objects: а — general view; б — waste serpentine sorbent; в — expanded vermiculite (fr. 0.45...2.00 mm); г — podzol (fr. < 2.0 mm)

*Деградированный подзол* (абразем) техногенной пустоши имел следующие характеристики: кислотность водной вытяжки почвы — 4,2...4,8, содержание органического углерода — 1,3 %, из которого содержание углерода гуминовых кислот — 0,35 %; содержание общего азота — 0,07 %, из которого 2,5...4,0 мг/кг — нитратного азота, и 0,8 мг/кг — аммонийного азота.

*Термовермикулит* крупностью 1–2 мм был получен из вермикулитового концентрата Ковдорского месторождения путем обжига при 500...550 °С на электрической модульно-спусковой печи конструкции Нижегородова. В печи реализован механизм термоудара как наиболее эффективный способ получения термовермикулита [26]. Образец исходного материала представляет собой типичную для Ковдорского месторождения разновидность вермикулита с заметной примесью флогопита. Химический состав вермикулита (мас.%): SiO<sub>2</sub> (30,9), MgO (27,0), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9,6), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5,3), CaO (4,0), Na<sub>2</sub>O (3,3), K<sub>2</sub>O (0,9), С (0,5), H<sub>2</sub>O (7,7). Твердость минерала составляла 2,1...2,8, плотность — 2,5 г/см<sup>3</sup>, рН — 7,0, обменная емкость — 80...150 мг-экв/100 г [27].

*Отработанный сорбент* был получен из магнезиально-силикатного реагента на основе серпентинито-магнезита Халиловского месторождения магнезита, Оренбургская обл. Основной компонент исходного материала — ортохризотил, в качестве примеси содержится магнезит. Химический состав исходного серпентинита (мас.%): SiO<sub>2</sub> (37,0), MgO (42,0), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (8,0), CaO (0,6), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,2), NiO (0,08), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,04), H<sub>2</sub>O (12,7).

Для получения сорбента серпентинито-магнезит измельчали до крупности менее 0,08 мм и прокаливали в лабораторной электрической вращающейся печи при температуре 650...700 °С. Порошок гранулировали с использованием турболопастного смесителя-гранулятора типа ТЛ 020. Процесс гранулирования и свойства гранул описаны в [23, 28]. Усредненный химический состав гранул сорбента (мас.%): SiO<sub>2</sub> (35,0...40,0), MgO (29,0...35,0), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,9...1,8), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9,0...13,0), CaO (0,6...0,8), NiO (0,4...0,5), S (0,2...0,3), H<sub>2</sub>O (14,6...19,8). Полученные гранулы применяли для очистки концентрированных кислых растворов от ионов цветных металлов и железа. Процесс осаждения металлов из раствора описан в [24].

*Схема эксперимента.* Исследовано несколько вариантов почвосмесей с разным массовым соотношением отработанного гранулированного серпентинового сорбента, термовермикулита и подзола. Состав почвосмесей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав почвосмесей, мас.%

Почвосмесь	S: M*(V: P)	S	V	P
VP-1	(1:1)	–	50	50
VP-2	(1:2)	–	33	67
VP-3	(1:4)	–	25	75
VSP-1	1:3(1:1)	25	37,5	37,5
VSP-2	1:3(1:2)	25	25	50
VSP-3	1:3(1:4)	25	15	60

Окончание табл. 1

Почвосмесь	S: M*(V: P)	S	V	P
VSP-4	1:4(1:1)	20	40	40
VSP-5	1:4(1:2)	20	26	54
VSP-6	1:4(1:4)	20	16	64
VSP-7	1:5(1:1)	16	42	42
VSP-8	1:5(1:2)	16	28	56
VSP-9	1:5(1:4)	16	16,8	67,2

\*M – смесь V и P.

Table 1

## Composition of soil mixtures, weight,%

Soil mixture	S: M*(V: P)	S	V	P
VP-1	(1:1)	–	50	50
VP-2	(1:2)	–	33	67
VP-3	(1:4)	–	25	75
VSP-1	1:3(1:1)	25	37.5	37.5
VSP-2	1:3(1:2)	25	25	50
VSP-3	1:3(1:4)	25	15	60
VSP-4	1:4(1:1)	20	40	40
VSP-5	1:4(1:2)	20	26	54
VSP-6	1:4(1:4)	20	16	64
VSP-7	1:5(1:1)	16	42	42
VSP-8	1:5(1:2)	16	28	56
VSP-9	1:5(1:4)	16	16.8	67.2

\*M – V and P mixtures.

*Методы исследования.* Насыпную плотность материалов определяли согласно методике, описанной в ГОСТ 19440-94 [29]. Максимальную влагоудерживающую способность определяли согласно ГОСТ 32632-2014 [30]. Гранулометрический анализ подзола выполнен методом ситового анализа для частиц фр. > 2 мм и на анализаторе частиц серии LS13320 (Backman Coulter) методом лазерной дифрактометрии в сочетании с технологией PIDS (регистрация дифференциальной интенсивности поляризованного света) для частиц фр. < 2 мм.

Для определения pH навески почвы и почвосмесей в количестве 5 г помещали в 50 мл дистиллированной воды и проводили измерения pH суспензий через 1 ч, 24 ч, 3 сут и 7 сут с помощью анализатора жидкости pH-метра-иономера «Эксперт-001» со стеклянным лабораторным электродом ЭСЛ-63-07СР и электродом вспомогательным лабораторным хлорсеребряным ЭВЛ-1МЗ.1. Через 7 сут взаимодействия суспензию фильтровали, а в полученном растворе определяли содержание химических элементов.

Фракционный состав тяжелых металлов в подзоле определяли с помощью методов последовательного фракционирования тяжелых металлов с выделением водорастворимой, подвижной, связанной органическим веществом, связанной с гидроксидами Fe и Mn, экстрагируемой концентрированной азотной кислотой (условно-валовой) и валовой (полное разложение) фракций [31—33].

Растворы анализировали на атомно-абсорбционном спектрометре «Квант-2А» фирмы «Кортек» и на приборе AAnalyst 400.

*Методика проведения фитотестирования.* Фитотестирование проводили по стандартному протоколу (ISO 11269-2, 2012). Для фитотестирования использовались тест-культуры — овес обыкновенный (*Avena sativa* L.) и клевер луговой (*Trifolium pratense* L.). Тест-параметры — длина и масса надземных органов растений. Эксперименты проводились в трех повторностях, результаты обрабатывались статистически ( $p < 0,95$ ).

## Результаты исследования и обсуждения

*Характеристика подзола.* Минеральный состав подзола представлен (в порядке уменьшения содержания) кварцем, полевым шпатом, вермикулитом, глаукофаном и гранатом [34]. Плотность составила 1,2 г/см<sup>3</sup>, пористость — 54,6 %, коэффициент пористости — 1,2, максимальная водоудерживающая способность — 134 %.

Преобладающими в гранулометрическом составе подзола являлись фракции 0,1...0,5 мм, 0,002...0,05 мм, 0,5...1 и >10 мм (рис. 2).

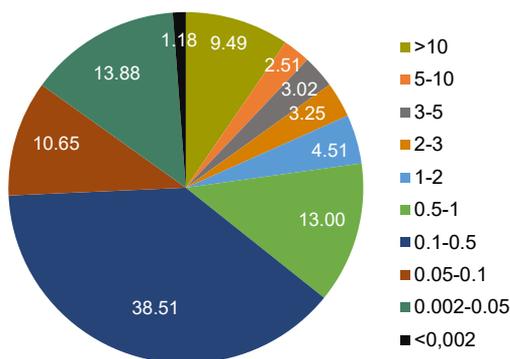
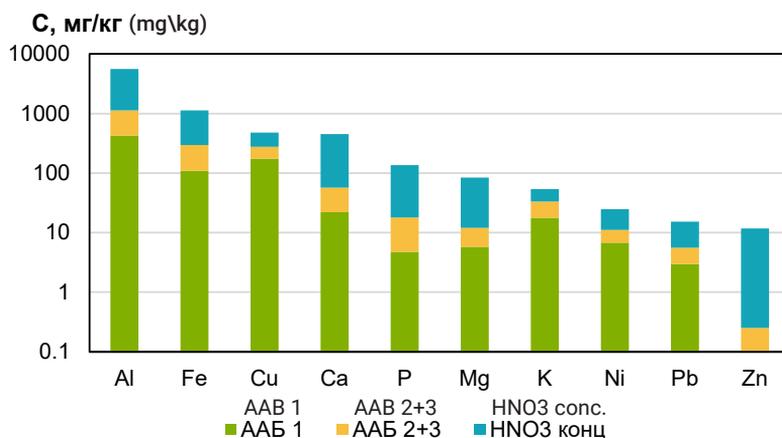


Рис. 2. Гранулометрический состав подзола

Fig. 2. Granulometric composition of podzol

Оценка гранулометрического состава согласно классификации Н.А. Качинского показала, что в подзоле преобладает средний песок (38,5 %), а также содержатся гравий (22,8 %), средняя и крупная пыль (13,9 %) и крупный песок (13 %), что соответствовало классу рыхлого песка с долей частиц фр. < 0,01 мм — 4 %.

Поскольку почва кислая (рН 4,2...4,8), она имела высокое содержание основных потенциально токсичных элементов (Cu, Ni, Al, Fe, Pb) в подвижной форме (рис. 3).



**Рис. 3.** Фракционный состав микро- и макрокомпонентов в техногенно загрязненном подзоле  
**Fig. 3.** Fractional composition of micro- and macrocomponents in industrially polluted podzol

Доля содержания элементов в подвижной фракции после трехкратной экстракции ААБ (актуально подвижная фракция) относительно содержания элементов после многоступенчатой экстракции ААБ и  $\text{HNO}_3$  конц. для потенциально токсичных металлов (ПТМ) составила (%): Cu (58,1), Ni (44,7), Pb (36,4), Fe (26,5), Al (20,2). Доля водорастворимой фракции ПТМ и элементов питания (%): Cu (2,3), Ni (12,5), Pb (0,3), Fe (0,6), Al (0,1), K (16,7), Mg (21,0), Ca (13,9), P (1,0).

Актуальная кислотность почвосмесей. Кислотонейтрализующая способность отработанного сорбента на основе серпентина составляла 7,04...9,02 мг-экв/г. Значения pH растворов после взаимодействия сорбента с дистиллированной водой составляли: 9,7...10,1 через 1 ч, 9,4...9,9 через 1 сутки; 9,4...9,7 через 7 суток.

Результаты по изменению pH почвосмесей в зависимости от количества добавленных в подзолистую почву вермикулита и отработанного сорбента приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Изменение значения pH почвосмесей в зависимости от количества добавленных термовермикулита и отработанного сорбента**

Длительность взаимодействия	VP			VSP								
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 ч	5,47	5,13	4,71	7,29	7,04	6,78	6,86	6,74	6,56	6,32	6,26	6,00
1 сут	6,62	5,99	5,51	8,53	8,49	8,45	8,19	8,33	8,26	7,71	7,27	7,34
3 сут	7,2	6,94	5,73	8,68	8,52	8,77	8,52	8,37	7,99	8,46	8,06	8,04
7 сут	7,27	6,94	5,54	8,83	8,78	8,65	8,77	8,6	8,37	8,43	8,38	8,07

Change in the pH value of soil mixtures depending on the amount of added expanded vermiculite and waste sorbent

Duration of interaction	VP			VSP								
	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 hour	5.47	5.13	4.71	7.29	7.04	6.78	6.86	6.74	6.56	6.32	6.26	6.00
1 day	6.62	5.99	5.51	8.53	8.49	8.45	8.19	8.33	8.26	7.71	7.27	7.34
3 days	7.2	6.94	5.73	8.68	8.52	8.77	8.52	8.37	7.99	8.46	8.06	8.04
7 days	7.27	6.94	5.54	8.83	8.78	8.65	8.77	8.6	8.37	8.43	8.38	8.07

Значение рН водной вытяжки исходной почвы составляло 4,65. Внесение рассматриваемых мелиорантов в подзол способствовало значительному снижению уровня кислотности почвы. При увеличении доли термовермикулита в смеси с подзолом значения рН суспензий через час взаимодействия увеличились до 4,71 в варианте 1:3 и до 5,47 в варианте 1:1. Увеличение продолжительности взаимодействия компонентов почвосмеси до семи суток привело к дальнейшему увеличению рН до 5,54 (1:3) и 7,27 (1:1). Значения рН почвосмесей с отработанным гранулированным сорбентом и термовермикулитом были пропорциональны количеству вносимого сорбента и продолжительности взаимодействия и составляли 8,04...8,86.

Для дальнейших экспериментов и химического анализа были выбраны варианты смесей с разным соотношением компонентов. На рис. 2 приведены результаты анализа водных растворов смесей подзола и термовермикулита после достижения химического равновесия. Содержание Ca, Mg и K для смесей VP-1 и VP-2 было близким, тогда как уменьшение доли термовермикулита в смеси до 25 % приводило к снижению содержания данных макроэлементов в 1,14 раза для калия и 1,4...1,5 раз — для кальция и магния.

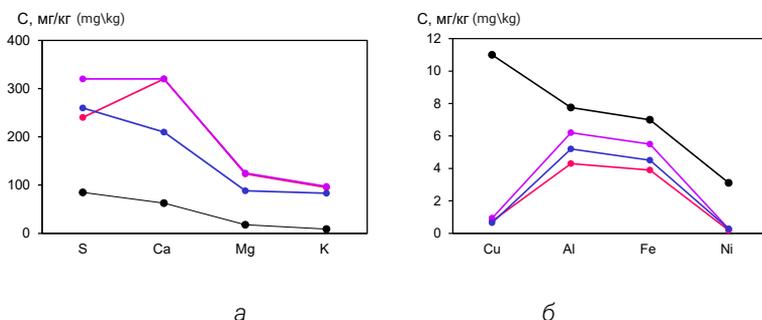


Рис. 4. Концентрация питательных (а) и потенциально токсичных (б) элементов в водных растворах выщелачивания смесей подзола с термовермикулитом:

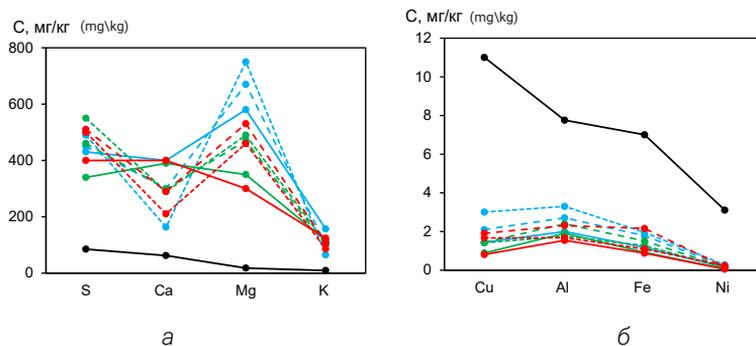
— V: P 1:1; — V: P 1:2; — V: P 1:4; — P

Fig. 4. Concentration of nutrient (a) and potentially toxic (б) elements in aqueous solutions of leaching of podzol and expanded vermiculite mixtures:

— V: P 1:1; — V: P 1:2; — V: P 1:4; — P

Добавление вермикулита снизило содержание водорастворимой фракции ПТМ: меди в 14,4 раз, а никеля — в 1,5 раза. Данный процесс можно объяснить сорбцией за счет ионного обмена для никеля и физической сорбцией для меди [21]. Для данных систем также наблюдалось уменьшение содержания водорастворимой фракции Al и Fe в 1,5 раза, при этом четкой закономерности от доли термовермикулита в смеси выявлено не было.

Добавление отработанного сорбента привело к дальнейшему снижению содержания водорастворимых Al и Fe (рис. 5).



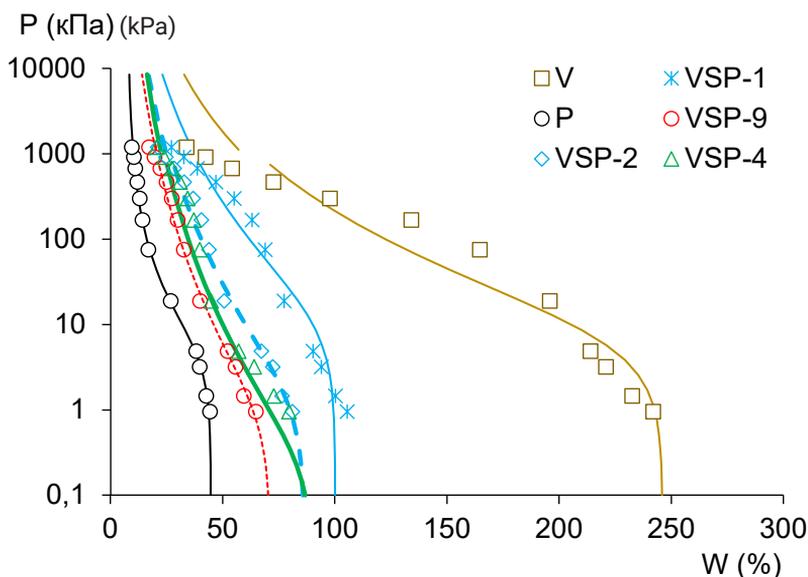
**Рис. 5.** Концентрации питательных (а) и потенциально токсичных (б) элементов в водных растворах выщелачивания смесей подзола P с термовермикулитом V и отработанным серпентиновым сорбентом S: — V: P 1:1; - - - - V: P 1:2; ..... V: P 1:3; — S:(V: P) 1:3; — S:(V: P) 1:4; — S:(V: P) 1:5

**Fig. 5.** Concentrations of nutrient (a) and potentially toxic (б) elements in aqueous leaching solutions of podzol P and expanded vermiculite V mixtures and waste serpentine sorbent S: — V: P 1:1; - - - - V: P 1:2; ..... V: P 1:3; — S:(V: P) 1:3; — S:(V: P) 1:4; — S:(V: P) 1:5

При внесении отработанного сорбента в почвосмесь происходила нейтрализация кислотности почвы, сопровождающаяся осаждением Al и Fe в виде труднорастворимых соединений [24]. Кроме того, добавление сорбента увеличивало концентрацию водорастворимой фракции S, Ca, Mg и K (см. рис. 5, а). Например, при максимальной доле сорбента в смеси, концентрация водорастворимого магния была в 33...42 раза больше, чем в подзоле. Следует отметить, что содержание магния было обратно пропорционально доле термовермикулита в данных системах, что может быть связано с катионным обменом магния на  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  и  $Ca^{2+}$  в межслоевом пространстве [35]. Это подтверждается увеличением содержания водорастворимого кальция по мере увеличения термовермикулита в смеси, которое составляло 163, 300 и 400 мг/кг для V: P (1:4), (1:2) и (1:1) соответственно. Концентрации водорастворимой фракции (мг/кг) P (<1,4), Mn (<0,73) и Si (<0,11) не изменялись при внесении сорбентов.

*Влагоудерживающая способность смесей с отработанным серпентиновым сорбентом.* Влагоудерживающая способность подзола составляла 134, термовермикулита — 270, отработанного сорбента — 117 %. Основная гидрофизическая характеристика, исследованная методом равновесного центрифугирования, была

определена для исходных термовермикулита и подзола и четырех контрастных вариантов почвосмесей: VSP-1 (1:3)(1:1) — смесь с минимальной долей подзола, VSP-9 (1:5)(1:4) — смесь с максимальной долей подзола, а также VSP-2 (1:3)(1:2) и VSP-4 (1:4)(1:1) — смеси, отличающиеся от предыдущих по доле термовермикулита и сорбента (рис. 6).



**Рис. 6.** Кривые основной гидрофизической характеристики подзола P, термовермикулита V и почвосмесей на их основе с добавлением отработанного серпентинового сорбента VSP-1 1:3(1:1), VSP-2 1:3(1:2), VSP-4 1:4(1:1) VSP-9 1:5(1:4)

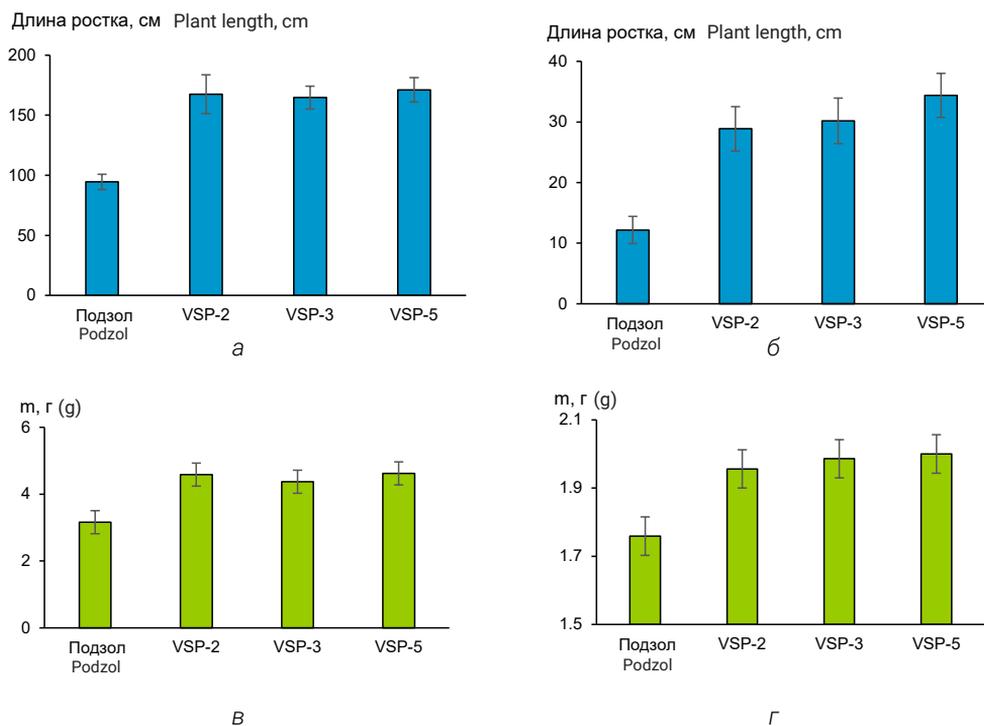
**Fig. 6.** Water retention curves of podzol P, expanded vermiculite V and soil mixtures based on them with the addition of waste serpentine sorbent VSP-1 1:3(1:1), VSP-2 1:3(1:2), VSP-4 1:4(1:1) VSP-9 1:5(1:4)

Наибольшей влагоудерживающей способностью обладал термовермикулит. Следует отметить неполное совпадение модельной кривой, рассчитанной по уравнению Ван Генухтена, с эмпирическими значениями. Большая влажность в области интенсивного массопереноса влаги (пленочно-капиллярной и капиллярной областях) по сравнению с модельной кривой связана с развитой удельной поверхностью и макропористостью вспученного вермикулита [36]. Отклонение эмпирических значений относительно модели в меньшую сторону в сорбционной области может быть объяснено гидратацией термовермикулита и как следствие — затрудненным выходом молекул воды из его структуры [37].

Кривая для VSP-1, содержащая 37,5 % термовермикулита, смещена вправо относительно VSP-2 с долей вермикулита 25 %. Взаимное расположение эмпирических значений влажности и модельной кривой для VSP-1 схоже с термовермикулитом V, тогда как уменьшение доли вермикулита в системе (VSP-2, VSP-9) приводило к наложению эмпирических данных на модельные кривые.

Влагоудерживающая способность серпентинового сорбента составляла 117 % и была ниже, чем у подзола (134 %). Однако, увеличение доли серпентинового сорбента на 5 % в VSP-1 по сравнению с VSP-4 (при равном соотношении термовермикулита и подзола) приводило к улучшению водопоглощения на 20 %. Это можно объяснить тем, что при увеличении доли сорбента увеличивалось содержание водорастворимого Mg в системе, вследствие чего происходила модификация и гидратация термовермикулита, находящегося в водной среде с избытком Mg, а именно встраивание ионов  $Mg^{2+}$  в межслоевые пространства путем катионного обмена. При этом содержание связанной воды в термовермикулите увеличивалось вследствие дополнительной гидратации  $Mg^{2+}$  [35].

**Фитотестирование.** Появление первых всходов для обеих тест-культур зафиксировано на третий день во всех вариантах эксперимента. Морфометрические показатели (высота и биомасса надземных органов) растений во всех вариантах почвосмесей были выше, чем в контроле (подзол) (рис. 7).



**Рис. 7.** Морфометрические показатели тест-культур через 21 день после начала эксперимента: длина ростков (а, б) и биомасса (в, г) *A. sativa* (а, в) и *T. pratense* (б, г)

**Fig. 7.** Morphometric parameters of test crops 21 days after the start of the experiment: plant length (а, б) and biomass (в, г) of *A. sativa* (а, в) and *T. pratense* (б, г)

Внесение добавок к техногенно загрязненной почве оказало стимулирующий эффект как на длину проростков, так и на прирост наземной биомассы. Масса *A. sativa* в опытных вариантах увеличилась в 1,4...1,5 раз, длина листьев — в 1,7...1,8 раз

по сравнению с контролем. Отклик *T. pratense* на внесение мелиорантов проявлялся в еще большем, по сравнению с *A. sativa*, увеличении длины ростков (2,4...2,8 раз) при меньшем влиянии почвосмеси на накопление биомассы в краткосрочном (21 день) эксперименте.

## Заключение

Определены физико-химические характеристики почвосмесей, состоящих из термовермикулита, отработанного серпентинового сорбента и почвы с высоким содержанием металлов. Добавление мелиорантов к кислому подзолу (рН 4,65) через 7 сут взаимодействия увеличивало щелочность почвы до 8,07 при соотношении сорбента, термовермикулита и почвы, %, 16:16,5:67,2 и до 8,83 при соотношении 25:37,5:37,5. Термовермикулит более чем на порядок увеличивал содержание водорастворимых К, Са и Mg, а также снижал содержание Cu и Ni в 14,4 и 1,5 раза соответственно. Добавление к системе серпентинового сорбента еще больше увеличило концентрацию водорастворимой фракции Са, Mg и К и снизило концентрацию потенциально токсичных металлов.

Внесение мелиорантов приводило к увеличению влагоудерживающей способности смесей по сравнению с подзолом, причем добавление к системе дополнительных 5 % сорбента при равном соотношении термовермикулита и подзола привело к увеличению полной влагоемкости на 20 %. Избыток магния в системе и его встраивание в межслоевые пространства путем катионного обмена с  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  и  $Ca^{2+}$  привело к дополнительному связыванию воды за счет гидратации магния. Это подтверждается существенным увеличением содержания водорастворимого Са по мере увеличения доли термовермикулита в смеси. Результаты фитотестирования показали, что добавление мелиорантов к подзолу снижало токсичность техногенно загрязненной почвы, что выражалось в увеличении длины и массы надземных органов растений.

Внесение смеси модифицированных слоистых силикатов (термовермикулита и отработанного серпентинового сорбента) приводило к улучшению гидрофизических и агрохимических характеристик техногенно загрязненной почвы, снижению ее кислотности и токсичности, улучшению морфометрических показателей тест-культур. Использование материалов из слоистых глинистых минералов, полученных из отходов горнодобывающей промышленности, для ремедиации экстремально загрязненной и деградированной почвы позволяет повысить эффективность технологий восстановления нарушенных территорий и способствует снижению объема накопленных отходов.

## Библиографический список

1. Андроханов В.А. Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Новосибирск, 2005. 32 с.
2. Kavamura V.N., Esposito E. Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals // Biotechnology advances. 2010. Vol. 28. № 1. С. 61—69. doi: 10.1016/j.biotechadv.2009.09.002

3. *Копцик Г.Н.* Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // *Почвоведение*. 2014. № 7. С. 851—868. doi: 10.7868/S0032180X14070077
4. *Kozlov M.V., Zvereva E.L.* Industrial barren: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2007. Т. 6. № 1. P. 231—259. doi: 10.1007/s11157-006-9117-9
5. *Калабин Г.В., Евдокимова Г.А., Горный В.И.* Оценка динамики растительного покрова нарушенных территорий в процессе снижения воздействия комбината «Североникель» на окружающую среду // *Горный журнал*. 2010. № 2. С. 74—77.
6. *Шишикин А.С., Абаимов А.П., Онучин А.А.* Методология и принципы организации исследований природных экосистем в регионах с экстремальным техногенным воздействием // *Сибирский экологический журнал*. 2014. Т. 21. № 6. С. 863—871.
7. *Сморкалов И.А., Воробейчик Е.Л.* Почвенное дыхание лесных экосистем в градиентах загрязнения среды выбросами медеплавильных заводов // *Экология*. 2011. № 6. С. 429—435.
8. *Hafeez F., Martin-Laurent F., Béguet J., Bru D., Cortet J., Schwartz Chr., Morel J.-I., Philippot L.* Taxonomic and functional characterization of microbial communities in Technosols constructed for remediation of a contaminated industrial wasteland // *Journal of Soils and Sediments*. 2012. № 12(9). P. 1396—1406. doi: 10.1007/s11368-012-0563-4
9. *Кашулина Г.М., Переверзев В.Н., Литвинова Т.И.* Трансформация органического вещества почв в условиях экстремального загрязнения выбросами комбината «Североникель» // *Почвоведение*. 2010. № 10. С. 1265—1275.
10. *Кашулина Г.М.* Экстремальное загрязнение почв выбросами медно-никелевого предприятия на Кольском полуострове // *Почвоведение*. 2017. № 7. С. 860—873.
11. *Sarkar S., Sarkar B., Basak B.B., Mandal S., Biswas B., Srivastava P.* Soil mineralogical perspective on immobilization/mobilization of heavy metals // *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices* / by eds. A. Rakshit, P. Abhilash, H. Singh, S. Ghosh. Singapore: Springer, 2017. P. 89—102. doi: 10.1007/978-981-10-3638-5\_4
12. *Cao C.-Y., Yu B., Wang M., Zhao Y.-Y., Wan X., Zhao Sh.* Immobilization of cadmium in simulated contaminated soils using thermal-activated serpentine // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2020. № 66(3). P. 499—505. doi: 10.1080/00380768.2020.1742583
13. *Zotiadis V., Argyraki A.* Development of innovative environmental applications of attapulgite clay // *Bull. Geol. Soc. Greece*. 2013. Vol. 47. № 2. P. 992—1001. doi: 10.12681/bgsg.11139
14. *Vhahangwele M., Mugeru G.W.* The potential of ball-milled South African bentonite clay for attenuation of heavy metals from acidic wastewaters: Simultaneous sorption of  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ , and  $\text{Zn}^{2+}$  ions // *J. Environ. Chem. Eng.* 2015. Vol. 3. № 4. P. 2416—2425. doi: 10.1016/j.jece.2015.08.016
15. *De la Calle C., Suquet H.* Chapter 12. Vermiculite // *Hydrous Phyllosilicates (Exclusive of Micas)* / edited by S.W. Bailey. Berlin, Boston: De Gruyter, 2018. pp. 455—496. doi: 10.1515/9781501508998-017
16. *Kremenetskaya I., Tereshchenko S., Alekseeva S., Mosendz I., Slukovskaya M., Ivanova L., Mikhailova I.* Vermiculite-lizardite ameliorants from mining waste // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 368. № 1. P. 012027. doi: 10.1088/1755-1315/368/1/012027
17. *Kremenetskaya I., Ivanova L., Chislov M., Zvereva I., Vasilieva T., Marchevskaya V., Semushin V., Slukovskaya M.* Physicochemical transformation of expanded vermiculite after long-term use in hydroponics // *Applied Clay Science*. 2020. Vol. 198. P. 105839. doi: 10.1016/j.clay.2020.105839
18. *Мосендз И.А., Кременецкая И.П., Новиков А.И., Терещенко С.В.* Очистка техногенно загрязненных водных объектов от меди и никеля вермикулит-сунгулитовыми материалами // *Цветные металлы*. 2021. № 2. С. 36—41. doi: 10.17580/tsm.2021.02.05
19. *Кременецкая И.П., Корытная О.П., Васильева Т.Н., Бубнова Т.П.* Особенности получения и применения фракционированного магнезиально-силикатного реагента // *Журнал прикладной химии*. 2012. Т. 85. № 10. С. 1553—1561.
20. *Федотова Е.В., Мосендз И.А., Кременецкая И.П., Дрогобужская С.В.* Формы осаждения меди и никеля сунгулитом и термовермикулитом // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2017. № 5—1 (8). С. 212—218.
21. *Slukovskaya M.V., Kremenetskaya I.P., Drogobuzhskaya S.V., Ivanova L.A., Mosendz I.A., Novikov A.I.* Serpentine mining wastes — Materials for soil rehabilitation in Cu-Ni polluted wastelands // *Soil Science*. 2018. Vol. 183. № 4. Pp. 141—149. doi: 10.1097/SS.0000000000000236
22. *Cao C.Y., Yu B., Wang M., Zhao Y.Y., Wan X., Zhao S.* Adsorption properties of  $\text{Pb}^{2+}$  on thermal-activated serpentine // *Separation Science and Technology*. 2019. Vol. 54. № 18. Pp. 3037—3045. doi: 10.1080/01496395.2019.1565776

23. Иванова Т.К., Кременецкая И.П., Гуревич Б.И. Получение и технологические характеристики гранулированного магнезиально-силикатного реагента // Химическая технология. 2018. Т. 20. № 1. С. 2—10.
24. Кременецкая И.П., Иванова Т.К., Гуревич Б.И., Новиков А.И., Семушин В.В. Раздельное осаждение металлов из высококонцентрированных растворов гранулированным магнезиально-силикатным реагентом // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 1. С. 118—130. doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-1-118-130
25. Ivanova T.K., Kremenetskaya I.P., Novikov A.I., Semenov V.G., Nikolaev A.G., Slukovskaya M.V. In Situ Control of Thermal Activation Conditions by Color for Serpentine with a High Iron Content // Materials. 2021. Vol. 14. № 21. P. 6731. doi: 10.3390/ma14216731
26. Kremenetskaya I., Alekseeva S., Slukovskaya M., Mosendz I., Drogobuzhskaya S., Ivanova L. Expanded vermiculite-reached product obtained from mining waste: the effect of roasting temperature on the agronomic properties // Hysicochem. Probl. Miner. Process. 2020. Vol. 56. № 1. P. 103—112. doi: 10.5277/ppmp19086
27. Аширов А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов. Л.: Химия, 1983. 295 с.
28. Иванова Т.К., Кременецкая И.П. Получение гранулированного серпентинито-магнезита с применением смесителя-гранулятора периодического действия // Наука и образование в арктическом регионе: материалы междунар. науч.-практич. конф. Мурманск, 2016. С. 68—73.
29. ГОСТ 19440-94. Порошки металлические. Определение насыпной плотности. Часть 1. Метод с использованием воронки. Часть 2. Метод волномера Скотта. М., 1994. 12 с.
30. ГОСТ 32632-2014. Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. М.: Стандартинформ, 2015. 15 с.
31. Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах: автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. М., 2016.
32. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V., Bauer T.V., Sushkova S.N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil // MethodsX. 2018. Vol. 5. P. 217—226. doi: 10.1016/j.mex.2018.02.007
33. Сиромля Т.И. К вопросу о подвижных формах соединений химических элементов в почвах // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16. № 2. С. 307—318.
34. Красавцева Е.А., Иванова Т.К., Мосендз И.А., Максимова В.В., Канарейкина И.П., Паникоровский Т.Л., Слуковская М.В. Гидрофизические свойства как лимитирующий фактор самовосстановления техногенных ландшафтов // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья: материалы междунар. конф. «Плаксинские чтения — 2021». Владикавказ, 2021. С. 562—565.
35. Feng J., Liu M., Fu L., Ma S., Yang J., Mo W., Su X. Study on the influence mechanism of Mg<sup>2+</sup> modification on vermiculite thermal expansion based on molecular dynamics simulation // Ceramics International. 2020. Vol. 46. № 5. P. 6413—6417. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.11.119
36. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012.
37. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005.

## References

1. Androkhonov VA. *Pochvenno-ekologicheskoe sostoyanie tekhnogennykh landshaftov: dinamika i otsenka* [Soil-ecological state of technogenic landscapes: dynamics and assessment] [Dissertation]. Novosibirsk; 2005. (In Russ.).
2. Kavamura VN, Esposito E. Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals. *Biotechnology advances*. 2010; 28(1):61—69. doi: 10.1016/j.biotechadv.2009.09.002
3. Koptsik GN. Modern approaches to remediation of heavy metal polluted soils: review. *Pochvovedenie*. 2014. № 7. С. 851—868. (In Russ.). doi: 10.7868/S0032180X14070077
4. Kozlov MV, Zvereva EL. Industrial barrens: extreme habitats created by non-ferrous metallurgy. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2007; 6(1):231—259. doi: 10.1007/s11157-006-9117-9
5. Kalabin GV, Evdokimova GA, Gornyi VI. Estimation of dynamics of grows of derelict lands in process of deleterious effect decrease of OJSC «Severonickel combine» on environment. *Gornyi zhurnal*. 2010; (2):74—77. (In Russ.).
6. Shishikin AS, Abaimov AP, Onuchin AA. Principles of research organization and methodology of natural ecosystems in regions under extreme technogenic impact. *Siberian journal of ecology*. 2014; 21(6):863—871. (In Russ.).

7. Smorkalov IA, Vorobeichik EL. Soil respiration of forest ecosystems in gradients of environmental pollution by emissions from copper smelters. *Russian journal of ecology*. 2011; 42(6):464—470. doi: 10.1134/S1067413611060166
8. Hafeez F, Martin-Laurent F, Béguet J, Bru D, Cortet J, Schwartz C, et al. Taxonomic and functional characterization of microbial communities in Technosols constructed for remediation of a contaminated industrial wasteland. *Journal of Soils and Sediments*. 2012; 12(9):1396—1406. doi: 10.1007/s11368-012-0563-4
9. Kashulina GM, Pereverzev VN, Litvinova TI. Transformation of the soil organic matter under the extreme pollution by emissions of the Severonikel smelter. *Eurasian Soil Science*. 2010; 43(10):1174—1183. doi: 10.1134/S1064229310100108
10. Kashulina GM. Extreme soil contamination by copper-nickel plant emissions on the Kola Peninsula. *Soil Science*. 2017; 50(7):837—849. doi: 10.1134/S1064229317070031
11. Sarkar S, Sarkar B, Basak BB, Mandal S, Biswas B, Srivastava P. Soil mineralogical perspective on immobilization/mobilization of heavy metals. In: *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices* Singapore: Springer; 2017. p.89—102. doi: 10.1007/978-981-10-3638-5\_4
12. Cao CY, Yu B, Wang M, Zhao YY, Wan X, Zhao S. Immobilization of cadmium in simulated contaminated soils using thermal-activated serpentine. *Soil Science and Plant Nutrition*. 2020; 66(3):499—505. doi: 10.1080/00380768.2020.1742583
13. Zotiadis V, Argyraki A. Development of innovative environmental applications of attapulgite clay. *Bull. Geol. Soc. Greece*. 2013; 47(2):992—1001. doi: 10.12681/bgsg.11139
14. Vhahangwele M, Mugeru GW. The potential of ball-milled South African bentonite clay for attenuation of heavy metals from acidic wastewaters: Simultaneous sorption of  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ , and  $\text{Zn}^{2+}$  ions. *J. Environ. Chem. Eng*. 2015; 3(4A):2416—2425. doi: 10.1016/j.jece.2015.08.016
15. De la Calle C, Suquet H. Vermiculite. In: Bailey S. (ed.) *Hydrous Phyllosilicates*. Berlin, Boston: De Gruyter; 2018. p.455—496. doi: 10.1515/9781501508998-017
16. Kremenetskaya I, Tereshchenko S, Alekseeva S, Mosendz I, Slukovskaya, M, Ivanova L, et al. Vermiculite-lizardite ameliorants from mining waste. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Volume 368. Moscow: IOP Publishing; 2019. p.012027. doi: 10.1088/1755-1315/368/1/012027
17. Kremenetskaya I, Ivanova L, Chislov M, Zvereva I, Vasilieva T, Marcheviskaya, et al. Physicochemical transformation of expanded vermiculite after long-term use in hydroponics. *Applied Clay Science*. 2020; 198:105839. doi: 10.1016/j.clay.2020.105839
18. Mosendz IA, Kremenetskaya IP, Novikov AI, Tereshchenko SV. Treatment of technogenically polluted water bodies from copper and nickel by vermiculite-sungulite materials. *Tsvetnye metally*. 2021; (2):36—41. (In Russ.). doi: 10.17580/tsm.2021.02.05
19. Kremenetskaya IP, Korytnaya OP, Vasilyeva TN, Bubnova TP. Peculiar features of preparation and application of fractionated magnesia-silicate reagent. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012; 85(10):1553—1561. doi: 10.1134/S1070427212100011
20. Fedotova EV, Mosendz IA, Kremenetskaya IP, Drogobuzhskaya SV. Forms of copper and nickel deposition by sungulite and thermovermiculite. *Transactions Kola science centre*. 2017; (5-1): 212—218. (In Russ.).
21. Slukovskaya MV, Kremenetskaya IP, Drogobuzhskaya SV, Ivanova LA, Mosendz IA, Novikov AI. Serpentine mining wastes—Materials for soil rehabilitation in Cu-Ni polluted wastelands. *Soil Science*. 2018; 183(4):141—149. doi: 10.1097/SS.0000000000000236
22. Cao CY, Yu B, Wang M, Zhao YY, Wan X, Zhao S. Adsorption properties of  $\text{Pb}^{2+}$  on thermal-activated serpentine. *Separation Science and Technology*. 2019; 54(18):3037—3045. doi: 10.1080/01496395.2019.1565776
23. Ivanova TK, Kremenetskaya IP, Gurevich BI. Production and technological characteristics of granulated magnesium-silicate reagent. *Chemical Technology*. 2018; 20(1):2—10. (In Russ.).
24. Kremenetskaya IP, Ivanova TK, Gurevich BI, Novikov AI, Semushin VV. Separate deposition of metals from highly concentrated solutions with granulated magnesia-silicate reagent. *Vestnik MSTU*. 2021; 24(1):118—130. (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-1-118-130
25. Ivanova TK, Kremenetskaya IP, Novikov AI, Semenov VG., Nikolaev AG, Slukovskaya MV. In Situ Control of Thermal Activation Conditions by Color for Serpentine with a High Iron Content. *Materials*. 2021; 14(21):6731. doi: 10.3390/ma14216731
26. Kremenetskaya I, Alekseeva S, Slukovskaya M, Mosendz I, Drogobuzhskaya S, Ivanova L. Expanded vermiculite-reached product obtained from mining waste: the effect of roasting temperature on the agronomic properties. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020; 56(1):103—112. doi: 10.5277/ppmp19086
27. Ashirov A. *Ionoobmennaya ochistka stochnykh vod, rastvorov i gazov* [Ion-exchange treatment of wastewater, solutions and gases]. Leningrad: Khimiya publ.; 1983. (In Russ.).

28. Ivanova TK, Kremenetskaya IP. Obtaining granulated serpentinite-magnesite with the use of batch mixer-granulator. In: *Science and education in the Arctic region: conference proceedings*. Murmansk; 2016. p.68—73. (In Russ.).
29. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. GOST 19440-94. *Metal powders. Determination of bulk density. Part 1. Method using a funnel. Part 2. Scott's volumometer method*. Moscow; 1994. (In Russ.).
30. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. GOST 32632-2014. *Test methods for chemical products hazardous to the environment*. Moscow: Standardinform; 2015. (In Russ.).
31. Ladonin DV. *Formy soedinenii tyazhelykh metallov v tekhnogenno-zagryaznennykh pochvakh* [Forms of heavy metal compounds in technogenically polluted soils] [Dissertation]. Moscow; 2016. (In Russ.).
32. Minkina TM, Mandzhieva SS, Burachevskaya MV, Bauer TV, Sushkova SN. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. 2018. *MethodsX*. 2018; 5:217—226. doi: 10.1016/j.mex.2018.02.007
33. Siromlya TI. Mobile forms of compounds of chemical elements in soils. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2009; 16(2):307—318. (In Russ.).
34. Krasavtseva EA, Ivanova TK, Mosendz IA, Maksimova VV, Kanarekina IP, Panikorovsky TL, et al. Hydrophysical properties as a limiting factor of self-restoration of man-made landscapes. In: *Problems of complex and environmentally safe processing of natural and man-made mineral raw materials: conference proceedings*. Vladikavkaz; 2021; p.562—565. (In Russ.).
35. Feng J, Liu M, Fu L, Ma S, Yang J, Mo W, et al. Study on the influence mechanism of Mg<sup>2+</sup> modification on vermiculite thermal expansion based on molecular dynamics simulation. *Ceramics International*. 2020; 46(5):6413—6417. doi: 10.1016/j.ceramint.2019.11.119.
36. Smagin AV. *Teoriya i praktika konstruirovaniya pochv* [Theory and practice of soil design]. Moscow; 2012. (In Russ.).
37. Shein EV. *Kurs fiziki pochv* [Course of physics of soils]. Moscow; 2005. (In Russ.).

#### Об авторах:

Иванова Татьяна Константиновна — младший научный сотрудник, лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, д. 14; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, 184209, Российская Федерация, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Академгородок, д. 26 а; e-mail: tk.ivanova@ksc.ru ORCID 0000-0002-8103-2279

Слуковская Марина Вячеславовна — старший научный сотрудник, лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, д. 14; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Академгородок, д. 26 а; департамент ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем, Аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 8, к. 2; e-mail: m.slukovskaya@ksc.ru ORCID 0000-0002-5406-5569

Мосендз Ирина Александровна — младший научный сотрудник, лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, д. 14; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева ФИЦ КНЦ РАН, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Академгородок, д. 26 а; e-mail: ia.mosendz@ksc.ru ORCID 0000-0003-3129-7305

*Красавцева Евгения Андреевна* — младший научный сотрудник, лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, д. 14; Институт проблем промышленной экологии севера ФИЦ КНЦ РАН, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Академгородок, д. 14а; e-mail: e.krasavtseva@ksc.ru  
ORCID 0000-0002-8821-4446

*Максимова Виктория Вячеславовна* — младший научный сотрудник, лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, д. 14; Институт проблем промышленной экологии севера ФИЦ КНЦ РАН, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Академгородок, д. 14а; e-mail: v.maksimova@ksc.ru  
ORCID 0000-0002-5080-5187

*Канарейкина Инна Павловна* — младший научный сотрудник, департамент ландшафтного проектирования и устойчивых экосистем, Аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198 г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 8, к. 2; e-mail: innesochkaaa@yandex.ru  
ORCID 0000-0003-1930-5050

*Широкая Анна Александровна* — инженер, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Академгородок, д. 26 а; e-mail: a.shirokaia@ksc.ru  
ORCID 0000-0002-1325-2499

*Кременецкая Ирина Петровна* — старший научный сотрудник, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Академгородок, д. 26 а; e-mail: i.kremenetskaia@ksc.ru  
ORCID 0000-0003-3531-8273

#### **About authors:**

*Ivanova Tatiana Konstantinovna* — Junior Researcher, Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic region, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, 14 Fersmana st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 26a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: tk.ivanova@ksc.ru  
ORCID 0000-0002-8103-2279

*Slukovskaya Marina Vyacheslavovna* — Senior Researcher, Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic region, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 14 Fersmana st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 26a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, RUDN University, 8/2 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: m.slukovskaya@ksc.ru  
ORCID 0000-0002-5406-5569

*Mosendz Irina Alexandrovna* — Junior Researcher, Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic region, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 14 Fersmana st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 26a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: ia.mosendz@ksc.ru  
ORCID 0000-0003-3129-7305

*Krasavtseva Evgeniya Andreyevna* — Junior Researcher, Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic region, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 14 Fersmana st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 26a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: e.krasavtseva@ksc.ru  
ORCID 0000-0002-8821-4446

*Maksimova Victoria Vyacheslavovna* — Junior Researcher, Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic region, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 14 Fersmana st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 14a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: v.maksimova@ksc.ru  
ORCID 0000-0002-5080-5187

*Kanareikina Inna Pavlovna* — Junior Researcher, Department of Landscape Design and Sustainable Ecosystems, RUDN University, 8/2 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: innesochkaaa@yandex.ru  
ORCID 0000-0003-1930-5050

*Shirokaya Anna Alexandrovna* — engineer, Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 26a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: a.shirokaia@ksc.ru  
ORCID 0000-0002-1325-2499

*Kremenetskaya Irina Petrovna* — Senior Researcher, Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 26a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: i.kremenetskaia@ksc.ru  
ORCID 0000-0003-3531-8273