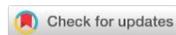


УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-109-128



Ссылки для цитирования:

Скурихина П.Д. Влияние кремнийорганического адсорбента на содержание подвижных форм тяжелых металлов и рост тест-культуры в условиях загрязнения почвы свинцом и медью // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 116. С. 109-128. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-109-128

Cite this article as:

Skurikhina P.D., Effect of organosilicon adsorbent on the content of mobile forms of heavy metals and growth of test-crop under conditions of soil contamination with lead and copper, Dokuchaev Soil Bulletin, 2023, V. 116, pp. 109-128, DOI: 10.19047/0136-1694-2023-116-109-128

Влияние кремнийорганического адсорбента на содержание подвижных форм тяжелых металлов и рост тест-культуры в условиях загрязнения почвы свинцом и медью¹

© 2023 г. П. Д. Скурихина

*Казанский федеральный университет, Россия,
420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 18, корп. 1,*

<https://orcid.org/0000-0003-0882-5990>, e-mail: sfagnium@mail.ru.

*Поступила в редакцию 15.01.2023, после доработки 30.05.2023,
принята к публикации 27.06.2023*

Резюме: Техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) представляется серьезной экологической проблемой. Для рекультивации почв, подвергшихся воздействию поллютантов, часто применяются различные сорбенты, в связи с этим поиск наиболее эффективного и многопланового сорбирующего вещества является актуальным. Смоделировано загрязнение гумусово-аккумулятивного горизонта светло-серой лесной легкосуглинистой почвы тяжелыми металлами: свинец (Pb^{2+}) и медь (Cu^{2+}). В качестве загрязнителей использовали

¹ Опубликовано по материалам VI конференции молодых ученых "Почвоведение: Горизонты будущего. 2022", посвященной 95-летию Почвенного института им. В.В. Докучаева.

растворы ацетата свинца ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) и сульфата меди ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$) трех разных концентраций (1ПДК, 5ПДК, 10ПДК). Растворы кремнийорганического адсорбента – 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрата (ПМСПГ) также вносились в трех различных вариантах: 0.01%; 0.1%; 1%. После загрязнения исследуемых образцов и внесения кремнийорганического адсорбента были определены подвижные соединения меди и свинца методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Экстракция поллютантов из почвы проводилась ацетатно-аммонийным буфером (pH = 4.8). Применение адсорбента значительно снизило концентрации подвижных соединений тяжелых металлов. Наиболее эффективным оказалось применение раствора ПМСПГ с концентрацией 1%. Проводился вегетационный эксперимент. В качестве тест-культуры использовался кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) сорта “Забава”. Выявлены благоприятные изменения в росте кресс-салата при использовании адсорбента с концентрацией 1% по отношению к контрольным вариантам.

Ключевые слова: загрязнение почв, хелатообразующие полимеры, сорбенты, силоксан, тяжелые металлы.

Effect of organosilicon adsorbent on the content of mobile forms of heavy metals and growth of test-crop under conditions of soil contamination with lead and copper¹

© 2023 P. D. Skurikhina

Federal Kazan Federal University,
18 building 1 Kremlevskaya Str., Kazan 420008, Russian Federation,
<https://orcid.org/0000-0003-0882-5990>, e-mail: sfagnium@mail.ru.

Received 15.01.2023, Revised 30.05.2023, Accepted 27.06.2023

Abstract: The pollution of soil by heavy metals becomes a prime ecological problem. Recultivation of polluted soil objects is usually made by means of different types of sorbents. So, in this connection the search for the most effective and multifunctional sorbing agent is relevant. The model experiment of soil pollution by several heavy metals in upper soil horizon was carried out.

¹ Proceedings of the VI Conference of Young Scientists “Soil Science: Horizons of the Future. 2022”, dedicated to the 95th anniversary of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute.

The soil for that research was Grey-Luvic Phaeozems. Lead (Pb^{2+}) and copper (Cu^{2+}) were chosen as pollutants. Solutions of lead acetate ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) and copper sulphate ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$) of three different concentrations (1 MPC, 5 MPC, 10 MPC) were used as pollutants. Solutions of organosilicon adsorbent – 1,1,3,3,3-tetrahydroxy-1,3-dimethyldisiloxane polyhydrate (PMSPG) were also applied in three different variants: 0.01%; 0.1%; 1%. The mobile forms of heavy metals were researched by method of atomic absorption spectrometry. The mobile forms of heavy metals were extracted by the ammonium acetate buffer ($pH = 4.8$). According to results, the application of organosilicon sorbent had a positive issue. Application of adsorbent significantly reduced the concentrations of mobile heavy metal compounds. The application of PMSPG solution with concentration of 1% was the most effective. A vegetation experiment was carried out. Cress (*Lepidium sativum* L.) of “Zabava” variety was used as a test-crop. Favourable changes in the growth of cress with the use of adsorbent at the concentration of 1% compared to the control variants were revealed.

Keywords: soil pollution, chelate polymers, sorbents, siloxane, heavy metals.

ВВЕДЕНИЕ

Биогеоценотические функции почвы являются важным аспектом изучения в экологии, поскольку во многом отражают основные естественные процессы, нарушение которых ведет к значительному изменению не только почв, но и всего биогеоценоза. Наиболее важной среди выше выделенной совокупности можно считать барьерную функцию, которая во многом обуславливает возможность поглощения почвой различных загрязнителей, а также дальнейшее их распределение по почвенному профилю. В свою очередь, эти механизмы во многом предупреждают поступление разного рода поллютантов в растения, что определяет значимость этого свойства почвы для человека ([Ломовский и др., 2016](#); [Минкина и др., 2008](#)).

Со стремительным увеличением промышленных территорий возрастает и площадь техногенно загрязненных почв. Накопление токсичных веществ как в самой почве, так и в растениях, произрастающих на загрязненных территориях, сказывается на функционировании всей экосистемы. Одними из самых опасных поллютантов можно считать тяжелые металлы (ТМ), поскольку при превышении ПДК они способны влиять на жизнедеятельность расте-

ний в целом ([Самонин и др., 2012](#)).

Из наиболее токсичных ТМ, широко используемых в металлургической промышленности, можно выделить свинец (Pb^{2+}) и медь (Cu^{2+}) ([Путилина, 2009](#)). Например, повышение концентрации подвижных соединений свинца снижает функциональность пигментных комплексов и уменьшает содержание хлорофилла в вегетативных органах растения, приводит к гибели побегов ([Удиванкин, 2006](#)), превышение ПДК по содержанию подвижных соединений меди вызывает некрозы, хлорозы у растений, ингибирует рост подземных и надземных органов ([Удиванкин, 2006](#)). В связи с этим актуальным является изучение методов для эффективной очистки почв от ТМ. На данный момент существует множество способов ремедиации почв от этих поллютантов: использование электрохимических и химических методик, цементирование, обратный осмос, применение различных мембранных технологий, адсорбция ТМ различными твердыми отходами (кора, белый шлам, опилки и др.) ([Кизилев и др., 2017](#); [Переломов и др., 2020](#)). Один из наиболее современных способов – применение специально синтезированных сорбентов различной природы: неорганической, органической, гибридной ([Кизилев и др., 2017](#)). Предполагается, что наиболее эффективно применение адсорбирующих веществ гибридной природы. Механизм адсорбции таких соединений заключается в образовании комплексов с металлами – хелатов ([Морозова и др., 2015](#)).

Среди всего разнообразия хелатообразующих сорбентов выделяют полисилоксановые полимеры. В основном это связано со специфическим строением адсорбентов силоксановой группы, которые способны образовывать матрицу с определенным размером пор. Также значительное преимущество данной функциональной группы – возможность размещения органических радикалов на поверхности этой матрицы. Таким образом, это свойство может обеспечить образование лигандной системы ([Лакиза и др., 2005](#)).

Одним из наиболее известных адсорбентов полиметилсилоксановой группы является 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрат (ПМСПГ). На данный момент это вещество обширно используется в качестве энтеросорбента в связи с высокой поглощательной способностью, слабой хими-

ческой реактивной способностью, гидрофобностью и низкой теплопроводностью ([Слинякова и др., 1988](#)). Кроме того, данное вещество можно синтезировать из силоксанового масла, которое используется во многих областях промышленности ([Слинякова и др., 1988](#)). Вместе с тем влияние веществ силоксановой группы на почву в качестве адсорбентов изучено недостаточно. В то же время существуют исследования, устанавливающие положительный эффект на процесс структурообразования в почве при внесении веществ силоксановой группы ([Сандип и др., 2020](#)). Ранее тестирование сорбирующих свойств ПМСПГ при внесении в почву не проводилось. Таким образом, необходимо определить не только воздействие адсорбента на поллютанты, в частности ТМ, но и установить, способен ли данный адсорбент как-либо влиять на жизнедеятельность растений при внесении в почву.

В настоящей статье представлены результаты исследований, цель которых – определить воздействие 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрата (ПМСПГ) на содержание подвижных соединений свинца и меди в почве, а также на рост вегетативных органов кресс-салата в условиях искусственного загрязнения почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследований были отобраны образцы из гумусово-аккумулятивного горизонта светло-серой лесной легкосуглинистой почвы на древнеаллювиальных отложениях. Отбор проб производился на территории Ботанического сада Казанского федерального университета (55°48'50" с. ш.; 49°14'39" в. д.) (табл. 1).

В качестве тест-объекта был использован кресс-салат (*Lepidium sativum* L.) сорта “Забава”, поскольку основными преимуществами выбранной культуры являются: быстрый рост, достаточно высокая всхожесть, высокая чувствительность к различным токсикантам, в частности, к тяжелым металлам ([Кубрина и др., 2021](#)). Для исследования применялся кремнийорганический адсорбент – 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрат (ООО “ТНК СИЛМА”, Россия)

Отобранные образцы почв были высушены до воздушно-

сухого состояния. Далее производилось просеивание почвы через сито 3 мм. Навеска почвы 320 г помещалась в вегетационные емкости. В качестве поллютантов использовали растворы ацетата свинца ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) и сульфата меди ($CuSO_4 \cdot 7H_2O$) трех разных концентраций. Растворы вносились в таких количествах, чтобы содержания ионов меди или свинца, вносимые в почвы, соответствовали содержанию элементов на уровнях 1ПДК, 5ПДК и 10ПДК. Затем в загрязненные почвы вносили растворы кремнийорганического адсорбента также в трех различных вариантах: 0.01%; 0.1%; 1%. Эксперимент проводился в трех повторностях для каждого варианта опыта. Сначала вносились растворы поллютантов, почва тщательно перемешивалась. После того, как образцы загрязненной почвы были доведены до воздушно-сухого состояния, добавляли растворы адсорбента указанных концентраций. Объем растворов подбирался экспериментально таким образом, чтобы на поверхности исследуемого образца не оказывалось избытка влаги.

Таблица 1. Некоторые свойства светло-серой лесной легкосуглинистой почвы

Table 1. Some properties of Grey-Luvic Phaeozem sandy-loamy soil

Глубина отбора образцов, см	Содержание гумуса, %	ЕКО, ммоль(экв)/100г	Содержание подвижных соединений свинца (Pb^{2+}), мг/кг	Содержание подвижных соединений меди (Cu^{2+}), мг/кг
10–12	2.3	19	0.3	0.048

Проводилось определение подвижных форм меди и свинца методом атомно-абсорбционной спектроскопии на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-7000 (SHIMADZU, Япо-

ния), экстракция соединений свинца и меди осуществлялась ацетатно-аммонийным буфером (рН = 4.8) ([ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.78-2013](#)).

Были определены энергия прорастания и всхожесть семян ([ГОСТ 12038–84](#)). Энергия прорастания составила – 89%, всхожесть семян – 86%. Затем проростки кресс-салата высаживались по 10 штук в каждый вариант опыта. Вегетационный опыт длился 15 дней и проводился в лабораторных условиях при средней температуре воздуха 23 °С, относительной влажности 53%, атмосферном давлении 101 кПа с использованием искусственного освещения. Полив тест-культуры производился с помощью пульверизатора. После этого было проведено измерение ростовых показателей растений – суммарной длины стебля и корня.

Полученные данные были обработаны с помощью методов математической статистики ($n = 3$, $p = 0.05$). Для определения разности между вариантами проводился однофакторный дисперсионный анализ с помощью статистического пакета STATGRAPHICS Plus 5.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлена гистограмма содержания подвижных форм свинца в почве (рис. 1) после применения ПМСПГ.

Кремнийорганический адсорбент способен существенно снижать концентрацию подвижных форм свинца. После внесения ПМСПГ (0.01%) содержание мобильных форм свинца снижается при 1ПДК на 6%, при 5ПДК на 14% и при 10ПДК на 19% относительно контроля. С повышением концентрации ПМСПГ в почве до 0.1% эффективность действия адсорбента закономерно увеличивается. Происходит уменьшение концентрации подвижного свинца при 1ПДК на 25%, при 5ПДК на 18%, при 10ПДК на 36%. При внесении дозы ПМСПГ 1% наблюдается повышение эффективности от применения адсорбента – происходит снижение содержания подвижных форм свинца при 1ПДК, 5ПДК, 10ПДК на 41%, 29% и 44% соответственно.

Для всех трех вариантов загрязнения устанавливается закономерность: с увеличением дозы адсорбента уменьшается количество подвижных форм загрязнителя.

Однако было установлено, что действенность ПМСПГ (0,1%, 1%) на уровне загрязнения 5ПДК значительно ниже, чем при уровнях загрязнителя 1ПДК и 10ПДК. Подобное проявление свойств ПМСПГ может являться следствием гибридной природы адсорбента. Данная тенденция может свидетельствовать о присутствии двух разных способов адсорбции свинца.

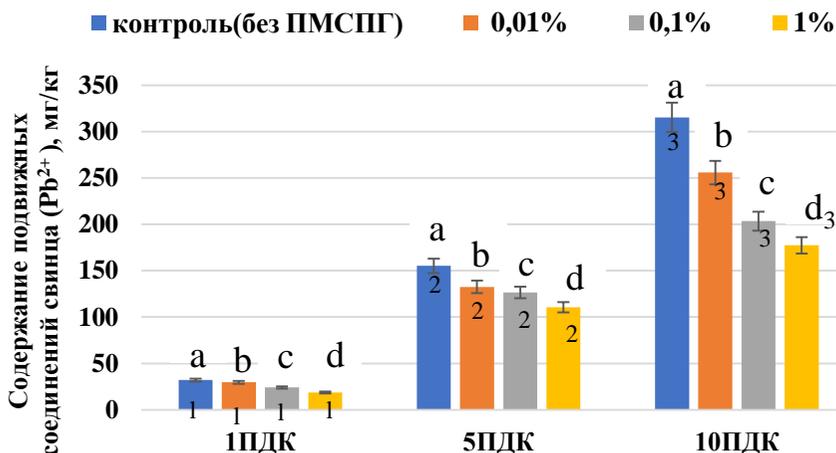


Рис. 1. Изменение среднего содержания подвижных соединений свинца (Pb^{2+}) в почве при внесении ПМСПГ в разных концентрация ($n = 3$, указаны средние значения \pm стандартное отклонение, буквами обозначены статистически достоверно отличающиеся значения при $p < 0.05$).

Fig. 1. Changes in average content of mobile lead (Pb^{2+}) in soil after application of polymethylsiloxane polyhydrate ($n = 3$, averages \pm standard deviation, letters – a, b, c, d – indicate significantly different values, $p < 0.05$).

Предположительно, первый способ осуществляется при помощи органической части адсорбента – метильных радикалов (Лакиза и др., 2005; Шачнева, 2016). Данные органические радикалы способны образовывать комплексные соединения с мобиль-

ными формами свинца, но мобильность свинца сравнительно низкая, поэтому эффективность этого механизма невысокая ([Путилина и др., 2009](#)). Второй предполагаемый способ поглощения мобильных соединений свинца осуществляется за счет пор установленного размера силоксановой матрицы ([Лакиза и др., 2005](#); [Жеребцов и др., 2021](#)). Возможно, что при применении низкой концентрации ПМСПГ (0.01%) поглощение подвижного свинца происходит по первому механизму ([Сорокин, 2018](#); [Фидурова и др., 2019](#)). С увеличением концентрации ТМ меняется и способ поглощения. В то же время за счет увеличения концентрации ПМСПГ (0.1%, 1%) в варианте 1ПДК увеличивается роль хелатообразования. Однако свободных метильных радикалов оказывается недостаточно для поглощения подвижных форм свинца при 5ПДК, поэтому впоследствии происходит изменение механизма. Таким образом, при дозе свинца 10ПДК после внесения ПМСПГ (в вариантах 0,1% и 1%) увеличивается уровень адсорбции за счет кремнийорганической матрицы.

Результаты вегетационного опыта показали, что происходит ингибирование роста кресс-салата при внесении свинца в почву на уровне 1ПДК на 19%, при 5ПДК – на 43%, при 10ПДК – на 57% относительно контроля (рис. 2).

В качестве ростовых показателей рассматривалась суммарная длина побега и корня, поскольку основной целью вегетационного опыта было установление влияния ПМСПГ на общую жизнеспособность проростков кресс-салата. Так при внесении ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) в образцы незагрязненной почвы изменений в развитии кресс-салата не выявлено. Влияние ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) на рост тест-культуры при внесении адсорбента в почву, загрязненную свинцом на уровнях 1ПДК и 5ПДК, также не было установлено. При загрязнении свинцом на уровне 10ПДК в варианте с внесением ПМСПГ на уровне 1% наблюдается улучшение ростовых показателей кресс-салата относительно варианта без применения ПМСПГ. Подобный эффект может быть связан с несколькими причинами. Во-первых, вовлечение пор силоксановой матрицы, заполненных водой, в процесс адсорбции приводит к высвобождению достаточного количества влаги в почву и может способствовать ускорению роста тест-культуры. Во-вторых, зна-

чительное снижение концентрации загрязнителя также может позитивно влиять на рост кресс-салата. Таким образом, использование адсорбента приводит к снижению концентрации свинца, но не воздействует на рост тест-культуры при малых концентрациях ПМСПГ (0.01%, 0.1%) при всех уровнях загрязнения почвы свинцом (1ПДК, 5ПДК, 10ПДК). Однако при более высокой концентрации ПМСПГ (1%) адсорбент оказывает значительное влияние на развитие тест-культуры в условиях загрязнения почвы свинцом при 10ПДК.

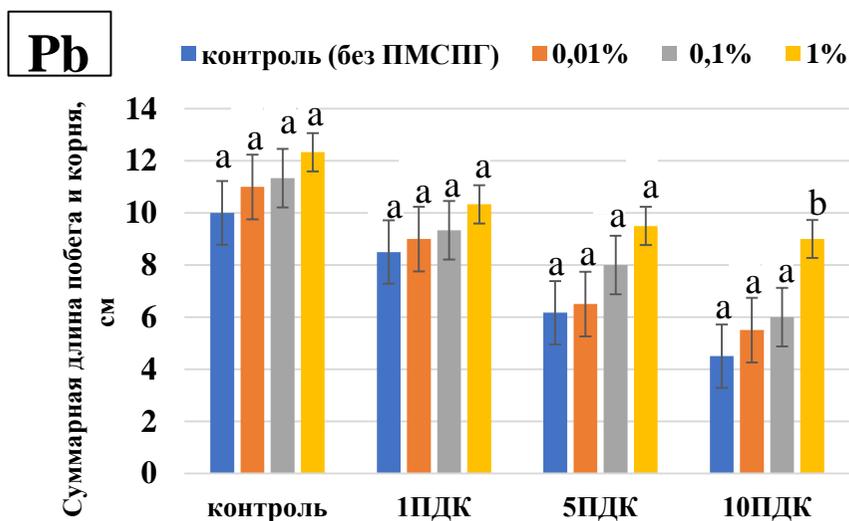


Рис. 2. Средняя суммарная длина побега и корня кресс-салата в загрязненных почвах свинцом (Pb^{2+}) при внесении ПМСПГ ($n = 3$, указаны средние значения \pm стандартное отклонение, буквами обозначены статистически достоверно отличающиеся значения при $p < 0.05$).

Fig. 2. Average total shoot and root length of cress in soils contaminated by lead (Pb^{2+}) after application of polymethylsiloxane polyhydrate ($n = 3$, averages \pm standard deviation, letters – a, b, c, d – indicate significantly different values, $p < 0.05$).

При загрязнении почвы разными дозами мобильных форм меди и внесении ПМСПГ устанавливается аналогичная закономерность, как и в случае загрязнения почвы свинцом (рис. 3).

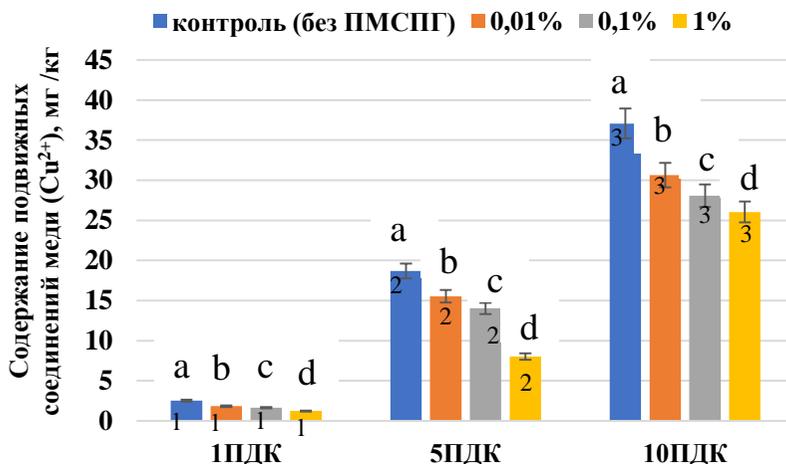


Рис. 3. Изменение среднего содержания подвижных соединений меди (Cu^{2+}) в почве при внесении ПМСПГ в разных концентрациях ($n = 3$, указаны средние значения \pm стандартное отклонение, буквами обозначены статистически достоверно отличающиеся значения при $p < 0.05$).

Fig. 3. Changes in average content of mobile copper (Cu^{2+}) in soil after application of polymethylsiloxane polyhydrate ($n = 3$, averages \pm standard deviation, letters – a, b, c, d – indicate significantly different values, $p < 0.05$).

В варианте с содержанием адсорбента 0.01% наблюдается снижение подвижных соединений меди: при 1ПДК – на 33%, при 5ПДК – на 17%, при 10ПДК – на 16%. Результаты показывают, что с увеличением загрязнения эффективность внесения адсорбента снижается. В вариантах с концентрацией ПМСПГ 0.1% влияние адсорбента усиливается при высоких дозах поллютанта. При дозе

загрязнителя 1ПДК количество экстрагируемой меди не увеличивается и составляет 33%, но при дозах 5ПДК и 10ПДК концентрация подвижных соединений элемента уменьшается на 26 и 24% соответственно. В варианте с ПМСПГ 1% количество мобильных соединений меди снижается на 67% при уровне 1ПДК, на 58% – при 5ПДК, на 30% – при 10ПДК.

Действенность низких концентраций ПМСПГ (0.01%, 1%) на уровне загрязнения 1ПДК, 5ПДК достаточно высокая. Как и в случае со свинцом, подобный эффект может быть связан с гибридной природой адсорбента, а также с некоторыми свойствами меди. По литературным данным, наиболее часто используются органические соединения для сорбции подвижной меди ([Абдугалипова и др., 2017](#); [Катгаев и др., 2016](#); [Пимнева и др., 2016](#)). Также установлено, что добавление некоторых органических кислот в состав минеральных сорбентов значительно увеличивает поглотительную способность по отношению к мобильной меди ([Дину и др., 2014](#); [Морозова и др., 2015](#)). Вероятно, механизм адсорбции меди связан в большей степени с образованием комплексов. При повышении концентрации меди до уровня 10ПДК снижается эффективность применения ПМСПГ. Предположительно, как и в случае со свинцом, это является следствием изменения механизма адсорбции ([Лакиза и др., 2005](#); [Саввин и др., 2011](#)). В связи с этим существуют значительные различия в эффективности применения ПМСПГ в зависимости от концентрации загрязнителя.

При проведении вегетационного опыта было установлено закономерное снижение ростовых показателей кресс-салата при внесении меди в почву на уровне 1ПДК – на 10%, 5ПДК – на 31%, 10ПДК – на 46% относительно контроля (рис. 4)

При внесении ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) в образцы незагрязненной почвы изменений в развитии кресс-салата не выявлено. Влияния ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) на рост тест-культуры в загрязненной медью почве на уровнях 1ПДК, и 5ПДК также не обнаружено. Однако при загрязнении медью на уровне 10ПДК при внесении ПМСПГ 1% наблюдается улучшение ростовых показателей относительно варианта 10ПДК без применения ПМСПГ. Сравнительное увеличение ростовых показателей кресс-салата, как и в

случае со свинцом, может быть связано как с вовлечением пор силикоксановой матрицы в процесс адсорбции, так и со значительным снижением концентрации загрязнителя на уровне 10ПДК.

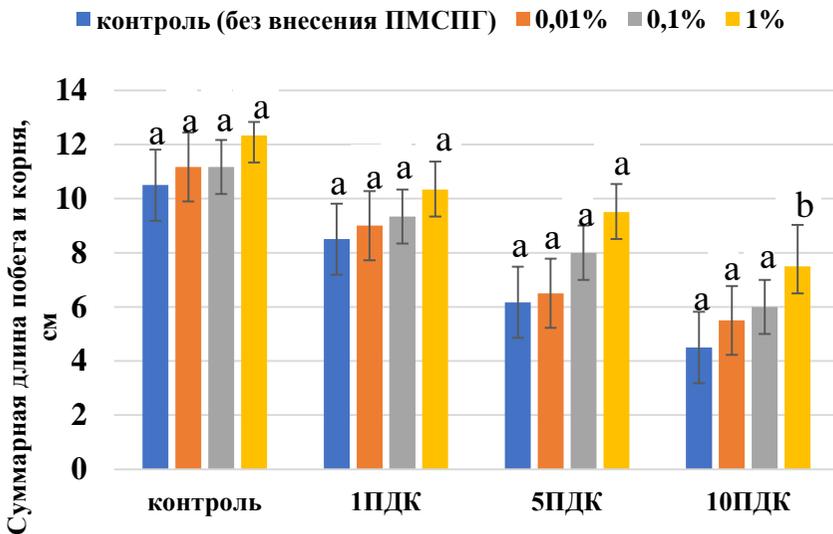


Рис. 4. Средние показатели суммарной длины побега и корня ростовые кресс-салата в загрязненных почвах медью (Cu^{2+}) при внесении ПМСПГ ($n = 3$, указаны средние значения \pm стандартное отклонение, буквами обозначены статистически достоверно отличающиеся значения при $p < 0.05$).

Fig. 4. Average total shoot and root length of cress in soils contaminated by mobile copper (Cu^{2+}) after application of polymethylsiloxane polyhydrate ($n = 3$, averages \pm standard deviation, letters – a, b, c, d – indicate significantly different values, $p < 0.05$).

Таким образом, как и в вариантах опыта при загрязнении почвы свинцом, исследуемый адсорбент вызывает снижение концентрации меди, но не влияет на рост тест-культуры при малых концентрациях ПМСПГ (0.01%, 0.1%) на всех уровнях загрязнения почвы медью (1ПДК, 5ПДК, 10ПДК). Однако более высокая

концентрация ПМСПГ (1%) способна оказывать значительное влияние на рост тест-культуры в условиях загрязнения почвы медью при 10ПДК.

ВЫВОДЫ

Кремнийорганический адсорбент – 1,1,3,3-тетрагидрокси-1,3-диметилдисилоксана полигидрат способен поглощать различные тяжелые металлы в почве, в частности подвижные формы свинца и меди. Концентрации ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) оказывают неравноценное влияние на адсорбцию ТМ. Наиболее значительное влияние на сокращение подвижных форм ТМ в почве оказали концентрации ПМСПГ 0.1% и 1%. Вместе с тем при загрязнении почвы свинцом на уровне 5ПДК и при внесении ПМСПГ (0.1%, 1%) наблюдаются достаточно низкие показатели поглощения ТМ относительно других вариантов. Предположительно, это связано как с некоторыми свойствами свинца, так и с гибридной природой адсорбента.

Существенного влияния внесения адсорбента (0.01%, 0.1%) на ростовые показатели тест-культуры выявлено не было. Возможно, это связано с высоким токсическим воздействием ТМ на кресс-салат, поскольку уровень загрязнения остается достаточно высоким даже после внесения ПМСПГ. Однако при внесении более высокой концентрации адсорбента (1%), предположительно, изменится механизм адсорбции, что сказывается положительно и на росте кресс-салата в условиях загрязнения почвы как свинцом, так и медью на уровне 10ПДК.

Таким образом, ПМСПГ (0.01%, 0.1%, 1%) не только снижает уровень загрязнения почвы ТМ, но и не оказывает ингибирующего действия на тест-культуру, как в контрольных вариантах, так и в загрязненных образцах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломовский О.И., Болдырев В.В. Механохимия в решении экологических задач // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. 2006. № 79. С. 1–221. URL: http://www.spsl.nsc.ru/download/ecology/V_79.pdf.

2. *Абдугалипова Н.М., Туробжонов С.М., Исмоилова Н.А.* Изучение механизма комплексообразования ионов меди на полученном анионообменном полимере АНФ // *Universum: технические науки.* 2017. №. 6(39). С. 20–25.
3. *Адамович Т.А., Зайцев М.А., Береснева Е.В.* Изучение сорбционных свойств торфа месторождений Кировской области // *Химия растительного сырья.* 2020. №. 2. С. 299–305.
4. *Адсорбенты из неорганических техногенных отходов / В.В. Самонин, Е.А. Спиридонова, А.С. Зотов* // *Экология и промышленность России.* 2021. Т. 25. № 12. С. 15–23. DOI: [10.18412/1816-0395-2021-12-15-23](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-15-23).
5. *Вольф М.П., Салиб-Бойгелаар Г.Б., Хунцикер П.* PDM с функциональными возможностями конструктора – свойства, стратегии модификации и приложения // *Прогресс в науке о полимерах.* 2018. С. 97–134.
6. ГОСТ 12038–84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Взамен ГОСТ 12038–66; введ. 1986-07-01. М.: Изд-во стандартов, 2011. 65 с.
7. *Дину М.И., Заитова В.О.* Влияние гуминовых кислот и фульвокислот на геохимическую миграцию ионов тяжелых металлов // *Естественные и технические науки.* 2014. №. 11–12. С. 92–96.
8. *Каттаев Н.Т., Бабаев Т.М., Рамазанов А.Х.* Исследование процесса сорбции ионов меди (II) новым комплекситом на основе акрилонитрила // *Universum: химия и биология.* 2016. №. 8 (26). С. 5.
9. *Кизилов О.А., Байкин Ю.Л., Овчинников П.Ю.* Применение минеральных сорбентов при загрязнении почв тяжелыми металлами // *Вестник биотехнологии.* 2017. №. 1. С. 16–16.
10. *Костина Л.В., Куюкина М.С., Ившина И.Б.* Методы очистки загрязненных тяжелыми металлами почв с использованием (био) сурфактантов (Обзор) // *Вестник Пермского университета. Серия: Биология.* 2009. №. 10. С. 95–110.
11. *Кубрина Л.В., Супиниченко Е.А.* Использование кресс-салата как тест-объекта для оценки загрязнения снежного покрова // *Научное обозрение.* 2021. № 1. С. 11–15.
12. *Лакиза Н.В., Неудачина Л.К., Ятлук Ю.Г., Багрецова М.А., Скорин Ю.А.* Новые кремнийорганические сорбенты для сорбции катионов металлов // *Аналитика и контроль.* 2005. № 4. С. 391–398.
13. *Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Манджиева С.С.* Барьерные функции системы почва–растение // *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение.* 2008. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bariernye-funksii-sistemy-pochva-rastenie>.

14. *Морозова В.Ю., Подвязников М.Л., Самонин В.В.* Влияние микродобавок фуллеренов на поглонительную способность неорганических сорбентов по d-элементам // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88. № 10. С. 1427–1431.
15. ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.78-2013. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли подвижных форм металлов: меди, цинка, свинца, кадмия, марганца, никеля, кобальта, хрома в пробах почв, грунтов, донных отложений, осадков сточных вод методом пламенной атомно-абсорбционной спектрометрии. Введ. 2013-05-24. М.: ФГБУ “ФЦАО”, 2013. 20 с.
16. *Переломов Л.В.* Использование природных и модифицированных глинистых минералов для ремедиации загрязненных почв и очистки сточных вод / *Л.В. Переломов, Ю.М. Апрощенко* // Университет XXI века: научное измерение: материалы научной конференции научно-педагогических работников, аспирантов, магистрантов ТГПУ им. Л.Н. Толстого. Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2020. С. 217–222.
17. *Пимнева Л.А., Лебедева А.А.* Исследование адсорбции ионов меди (II) модифицированным природным сорбентом // Международный журнал экспериментального образования. 2016. №. 9–1. С. 69–70.
18. *Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И.* Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции. Сер. Экология. Вып. 90. Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2009. 155 с.
19. *Саввин С.Б., Михайлова А.В., Ефимов Н.Н., Минин В.В.* Сорбция комплексов меди (II) гидрогелем // Химическая технология. 2011. Т. 12. №. 3. С. 171–176.
20. *Самонин В.В., Никонова В.Ю., Подвязников М.Л.* Исследование сорбционных свойств модифицированных фуллеренами активных углей по отношению к ионам металлов // Защита металлов. 2008. Т. 44. №. 2. С. 204–206.
21. *Сандип Б., Саад Дж., Брюкманн Р., Вилль П.* Патент № 2735231 С1 Российская Федерация, С09К 17/38 (2020.08); С08G 77/46 (2020.08); С08G 77/388 (2020.08); С08L 83/08 (2020.08). Улучшитель почвы для снижения натриевости и распыления для улучшения подвижности воды в различных почвах. № 2019128341. Заявл. 06.02.2018. Опубл. 29.10.2020. Бюл. № 31.
22. *Слинякова И.Б., Денисова Т.И.* Кремнийорганические адсорбенты: Получение, свойства, применение. Киев: Наук. думка, 1988. 190 с.
23. *Удиванкин А.В.* Влияние тяжелых металлов и их смесей на содержание белков и фотосинтетических пигментов в побегах кресс-

салата (*Lepidium sativum*) // Вестник СамГУ. 2006. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tyazhelyh-metallov-i-ih-smesey-na-soderzhanie-belkov-i-fotosinteticheskikh-pigmentov-v-pobegah-kress-salata-lepidium-sativum>.

24. Фидурова С.Н., Сютова Е.А. Минеральный сорбент СВ-100 для сорбции свинца // Актуальные проблемы химии и образования. 2019. С. 93–96.

25. Фундаментальные и прикладные проблемы получения новых материалов: исследования, инновации и технологии. Материалы научных трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти Алыкова Наримана Мирзаевича / Джигола Л.А. Астрахань: Сорокин Роман Васильевич, 2018. 352 с.

26. Шачнева Е.Ю. Применение сорбента СВ-1-AL2 для концентрирования ионов свинца // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2016. №. 1. С. 26–30.

27. Жеребцов О.В., Агаджанян Е.Ф., Каменчук Я.А. Адсорбент полиметилсилоксана полигидрат и способ его получения. Патент № 2761627 С1 Российская Федерация, МПК C01B 33/155, A61K 31/695. № 2020139330. Заявл. 01.12.2020. Оpubл. 13.12.2021. Заявитель ООО “Гротекс”.

REFERENCES

1. Lomovskij O.I., Boldyrev V.V., Mekhanohimiya v reshenii ekologicheskikh zadach (Mechanochemistry in solving environmental problems), *Ekologiya*, 2006, No. 79., pp. 1–221, URL: http://www.spsl.nsc.ru/download/ecology/V_79.pdf.

2. Abdutalipova N.M., Turobzhonov S.M., Ismoilova N.A., Izuchenie mekhanizma kompleksobrazovaniya ionov medi na poluchennom anionoobmennom polimere ANF (Studying the mechanism of copper ion complexation on the obtained anion-exchange polymer ANF), *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2017, No. 6 (39), pp. 20–25.

3. Adamovich T.A., Zajcev M.A., Beresneva E.V., Izuchenie sorbcionnyh svojstv torfa mestorozhdenij Kirovskoj oblasti (Studying the mechanism of copper ion complexation on the obtained anion-exchange polymer ANF), *Himiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, No. 2, pp. 299–305.

4. Samonin V.V., Spiridonova E.A., Zotov A.S., Adsorbenty iz neorganicheskikh tekhnogennyh othodov (Adsorbents from inorganic technogenic waste), *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2021, Vol. 25, No. 12, pp. 15–23, DOI: [10.18412/1816-0395-2021-12-15-23](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-12-15-23).

5. Wolf M.P., Salib-Boigelaar G.B., Hunziker P., PDM with Designer Functionality – Properties, Modification Strategies, and Applications, *Progress in the science of polymers*, 2018, pp. 97–134.
6. GOST 12038–84. Seeds of agricultural crops. Methods of germination determination, Instead of GOST 12038–66; introduced 1986.07.01, Moscow: Izd-vo standartov, 2011, 65 p.
7. Dinu M.I., Zaitova V.O., Vliyanie guminovykh kislot i ful'vokislot na geohimicheskuyu migratsiyu ionov tyazhelykh metallov (Effect of humic acids and fulvic acids on the geochemical migration of heavy metal ions), *Estestvennyye i tekhnicheskie nauki*, 2014, No. 11–12, pp. 92–96.
8. Kattaev N.T., Babaev T.M., Ramazanov A.H., Issledovanie processa sorbcii ionov medi (II) novym kompleksitom na osnove akrilonitrila (Study of copper ions (Cu) sorption by a new acrylonitrile-based complexite), *Universum: himiya i biologiya*, 2016, No. 8 (26), p. 5.
9. Kizilov O.A., Bajkin Yu.L., Ovchinnikov P.Yu., Primenenie mineral'nykh sorbentov pri zagryaznenii pochv tyazhelymi metallami (Study of copper ions (Cu) sorption by a new acrylonitrile-based complexite), *Vestnik biotekhnologii*, 2017, No. 1, pp. 16–16.
10. Kostina L.V., Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Metody ochistki zagryaznennykh tyazhelymi metallami pochv s ispol'zovaniem (bio) surfaktantov (Obzor) (Study of copper ions (Cu) sorption by a new acrylonitrile-based complexite), *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2009, No. 10, pp. 95–110.
11. Kubrina L.V., Supinichenko E.A., Ispol'zovanie kress-salata kak test-ob"ekta dlya otsenki zagryazneniya snezhnogo pokrova (Using watercress as a test object for assessing snow cover pollution), *Nauchnoe obozrenie*, 2021, No. 1, pp. 11–15.
12. Lakiza N.V., Neudachina L.K., Yatluk Yu.G., Bagrecova M.A., Skorin Yu.A., Novye kremnijorganicheskie sorbenty dlya sorbcii kationov metallov (New organosilicon sorbents for sorption of metal cations), *Analitika i kontrol'*, 2005, No. 4, pp. 391–398.
13. Minkina T.M., Motuzova G.V., Mandzhieva S.S., Bar'ernyye funktsii sistemy pochva-rastenie (Barerene functions of the soil-plant system), *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 17. Pochvovedenie*, 2008, No. 2, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bariernye-funktsii-sistemy-pochva-rastenie>.
14. Morozova V.Yu., Podvyaznikov M.L., Samonin V.V., Vliyanie mikroobavok fullerenov na poglotitel'nyuyu sposobnost' neorganicheskikh sorbentov po d-elementam (Effect of fullerene microadditives on the absorption capacity of inorganic sorbents for d-elements), *Zhurnal prikladnoy himii*, 2015, Vol. 88, No. 10, pp. 1427–1431.

15. PND F 16.1:2:2.2:2.3.78-2013. Quantitative chemical analysis of soils. Methods for measuring the mass fraction of mobile forms of metals: copper, zinc, lead, cadmium, manganese, nickel, cobalt, chromium in samples of soil, sediments, sewage sludge by flame atomic absorption spectrometry, 2013.05.24, Moscow: FGBU "FCAO", 2013, 20 p.
16. Perelomov L.V., The use of natural and modified clay minerals for the remediation of contaminated soils and wastewater treatment, *University of the XXI century: scientific dimension: materials of the Scien. Conf. of scientific and pedagogical workers, graduate students, undergraduates of L.N. Tolstoy TSPU*, Tula: Tula State Pedagogical University. L.N. Tolstoy, 2020, pp. 217–222.
17. Pimneva L.A., Lebedeva A.A., Issledovanie adsorbicii ionov medi (II) modificirovannym prirodnyim sorbentom (Study of copper ions (Cu) adsorption by a modified natural sorbent), *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*, 2016, No. 9–1, pp. 69–70.
18. Putilina V.S., Galickaya I.V., Yuganova T.I., *Adsorbciya tyazhelyh metallov pochvami i gornymi porodami. Harakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbicii* (Characteristics of the sorbent, conditions, parameters and mechanisms of adsorption. Adsorption of heavy metals by soils and rocks), Novosibirsk: GPNTB SO RAN, 2009, 155 p.
19. Savvin S.B., Mihajlova A.V., Efimov N.N., Minin V.V., Sorbciya kompleksov medi (II) gidrogelem (Sorption of copper (Cu) complexes by hydrogel), *Himicheskaya tekhnologiya*, 2011, Vol. 12, No. 3, pp. 171–176.
20. Samonin V.V., Nikonova V.Yu., Podvyaznikov M.L., Issledovanie sorbcionnyh svoystv modificirovannyh fullerenami aktivnyh uglej po otnosheniyu k ionam metallov (Study of sorption properties of fullerene-modified active carbons with respect to metal ions), *Zashchita metallov*, 2008, Vol. 44, No. 2, pp. 204–206.
21. Sandeep Bhatt, Saad John, Ralph Brückmann, Will Peter, Patent No. 2735231 C1 Russian Federation, C09K 17/38 (2020.08); C08G 77/46(2020.08); C08G 77/388(2020.08); C08L 83/08 (2020.08). *Soil improver for sodium reduction and spraying to improve water mobility in various soils*, No. 2019128341, Appl. 02/06/2018, publ. 29.10.2020, Bull. No. 31.
22. Slinyakova I.B., Denisova T.I., *Organosilicon adsorbents: Preparation, properties, application*, Kyiv: Nauk. thought, 1988, 190 p.
23. Udivankin A.V., Vliyanie tyazhelyh metallov i ih smesej na sodержanie belkov i fotosinteticheskikh pigmentov v pobegah kress-salata (*lepidium sativum*) (Effect of heavy metals and their mixtures on the content of proteins and photosynthetic pigments in cress shoots (*Lepidium sativum*)), *Vestnik SamGU*, 2006, No 7, URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie->

[tyzhelyh-metallov-i-ih-smesey-na-soderzhanie-belkov-i-fotosinteticheskikh-pigmentov-v-pobegah-kress-salata-lepidium-sativum.](#)

24. Fidurova S.N., Syutova E.A., Mineral'nyj sorbent SV-100 dlya sorbcii svinca (Mineral sorbent CB-100 for lead sorption), In: *Aktual'nye problemy himii i obrazovaniya*, 2019, pp. 93–96.

25. Dzhigola L.A., Fundamental'nye i prikladnye problemy polucheniya novyh materialov: issledovaniya, innovacii i tekhnologii (Fundamental and applied problems of producing new materials: research, innovation and technology), Proc. XII Int. Scien. and Pract. Conf. to the memory of Alykov Nariman Mirzaevich, Astrahan': Izdatel': Sorokin Roman Vasil'evich, 2018, 352 p.

26. Shachneva E.Yu., Primenenie sorbenta SV-1-AL2 dlya koncentrirvaniya ionov svinca (Application of CB-1-AL2 sorbent for lead ions concentration), *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2016, No. 1, pp. 26–30.

27. Zherebcov O.V., Agadzhanian E.F., Kamenchuk Ya.A., Adsorbent polimetilsiloksana poligidrat i sposob ego polucheniya (Polymethylsiloxane polyhydrate adsorbent and method of its productio), Patent No. 2761627 C1 Russian Federation, MPK C01B 33/155, A61K 31/695, No. 2020139330, applied 01.12.2020, publ. 13.12.2021, LLC “Groteks”.