



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 621.383:621.472

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13568

Исследования и разработка метода ремедиации повреждённых почв сорбентами

Игорь Александрович Козлов[✉], Валерий Алексеевич Мамонов

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия, cnn.67@mail.ru[✉]

Аннотация. Методы синтеза композитов с участием природных биологических компонентов привлекают всё большее внимание для получения сорбционных функциональных материалов. В работе синтезированы сорбционные композиционные составы на основе природных компонентов и техногенных отходов деревообрабатывающей, гидролизной и химической отраслей промышленности, содержащие природные бактерии семейства *Bacillus subtilis*. Установлена их высокая адсорбционная активность в процессах очистки и восстановления повреждённого почвенного покрова техногенными токсикантами, в частности нефтепродуктами. В статье рассматривается глобальная экологическая проблема техногенного загрязнения почв, приводящая к деградации и опустыниванию земель (desertification) – превращению некогда цветущих и плодородных территорий в пустыни без влаги и растительности. Техногенные загрязнители почвы критически изменяют её химический состав, физические и биологические свойства. Цель работы – разработать эффективный метод нейтрализации токсикантов, различной природы с помощью сорбентов. Предложен физико-химический метод ремедиации повреждённых земель посредством применения сорбентов, позволяющих улучшить структуру почв, локализовать вредные воздействия техногенных загрязнителей.

Ключевые слова: адсорбенты, сорбционные процессы, экология, техногенная деградация почв, токсиканты, нефтепродукты, опустынивание, ремедиация земель, гумус.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 125012200583-5.

Для цитирования: Козлов И.А., Мамонов В.А. Исследования и разработка метода ремедиации повреждённых почв сорбентами // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 6. С. 839-844. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13568>

Original article

Research and development of a method for the remediation of damaged soils using

Igor A. Kozlov[✉], Valery A. Mamonov

Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, cnn.67@mail.ru[✉]

Annotation. Methods of synthesizing composites with the participation of natural biological components are attracting increasing attention for the production of sorption functional materials. The paper synthesizes sorption composites based on natural components and technological waste from the woodworking, hydrolysis and chemical industries, containing natural bacteria of the *Bacillus subtilis* family. Their high adsorption activity has been established in the processes of cleaning and restoration of damaged soil cover by technogenic toxicants, in particular petroleum products. The article examines the global environmental problem of man-made soil pollution, which leads to land degradation and desertification (desertification) - the transformation of once flourishing and fertile territories into deserts without moisture and vegetation. Technogenic pollutants of the

soil critically change its chemical composition, physical and biological properties. The aim of the work is to develop an effective method of neutralizing toxicants of various nature using sorbents. A physico-chemical method for the rehabilitation of damaged lands through the use of sorbents is proposed, which make it possible to improve the soil structure and localize the harmful effects of man-made pollutants.

Keywords: adsorbents, sorption processes, ecology, anthropogenic soil degradation, chemicals, petroleum products, desertification, land remediation, humus.

Acknowledgements: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of state assignment No. 125012200583-5.

For citation: Kozlov I.A., Mamonov V.A. Research and development of a method for the remediation of damaged soils using. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(6): 652-661. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13568>

Введение

Одним из основных факторов загрязнения земель и экосистемы в целом является техногенное химическое загрязнение почв промышленными предприятиями. Площадь плодородных земель в Российской Федерации, подвергающихся загрязнению химическими токсикантами за счёт выбросов предприятий, составляет 90 млн га [1]. Подобная проблема существует и в странах Западной Европы, США, странах Азии. Площадь техногенного загрязнения земель, например, в Великобритании равна 200 тыс га, в США существует государственная программа *Superfund*, которая предусматривает очистку и ремедиацию более 1300 участков повреждённых земель [2-4]. Следует заметить, Россия значительно отстает в практике развития инновационных технологий в области ликвидации загрязнения почв.

Цель исследований – разработка эффективных способов, технологий получения сорбентов и их композиций с различными добавками. Это важнейшая научная задача, решение которой значительно повысит эффективность восстановления повреждённых почв.

Экспериментальная часть

В экспериментах использовались образцы почв (находящихся в сельскохозяйственном обороте и нефтезагрязнённых), отобранные в Тюменской области в зоне влияния нефтедобывающих компаний группы «Лукойл».

В качестве одного из компонентов сорбента использовались образцы технического гидролизного лигнина, отобранного с законсервированных отвалов гидролизных производств. Лигнин представлял собой аморфный порошок темно-коричневого цвета, без запаха, влажностью от 30.0 до 80.0 % (на а.с.в.), рисунок 1.

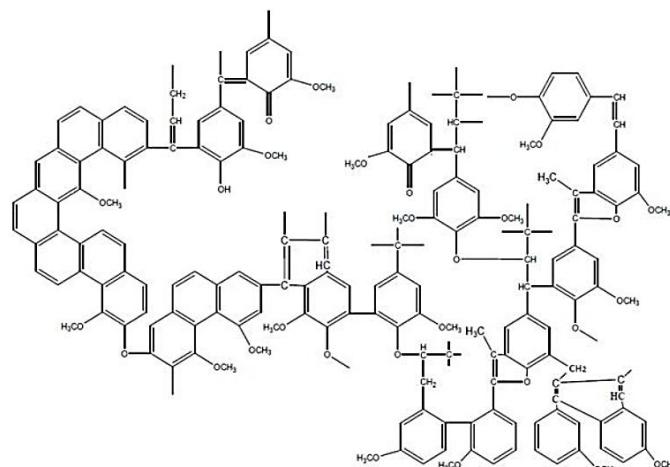


Рис. 1. Химическая структура технического гидролизного лигнина

Fig. 1. Chemical structure of technical hydrolyzed lignin

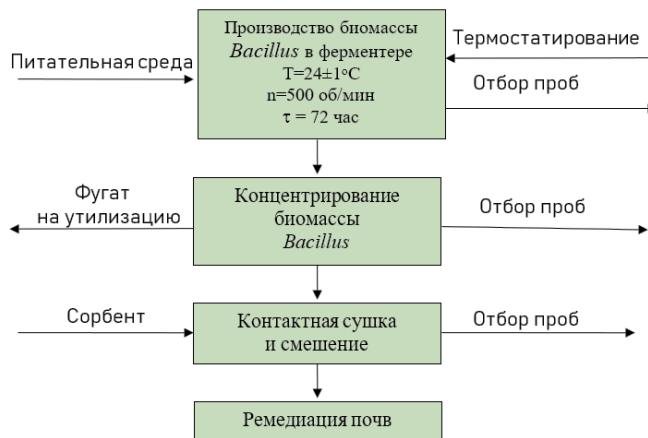


Рис. 2. Стадии получения синтеза сорбента
Fig. 2. Stages of obtaining sorbent synthesis

Получение и выращивание почвенных бактерий *Bacillus*. Питательная среда содержала гормон роста растений аминокислоты. Состав, г/дм³: белковая основа (гидролизат муки рыбной) – 20, *peptone* – 10, NaCl – 3, природная (неочищенная) вода – до 1 дм³. Продолжительность процесса до 4 сут., температура постепенно повышалась от 25 до 35°C, процесс проводился с непрерывным перемешиванием и терmostатированием. Наличие бактерий определяли методом Пастера-Коха [5]. Для достоверности полученных результатов проводили три параллельных эксперимента.

Получение сорбента. Смешение компонентов комплексного природного сорбента проводили на лабораторном сушильном смесителе СН-100. Концентрирование питательного раствора проводилось на роторном испарителе (AIBOTE НЕА-01В, Китай) при глубоком вакууме и низкой температуре для обеспечения выживаемости бактерий.

Последовательность стадий, методов и технологические параметры получения сорбента для ремедиации повреждённых почв, рисунок 2.

Обсуждение результатов

Наиболее перспективными являются сорбенты, состоящие из природных химических и биологических компонентов.

Такие сорбенты выступают в роли почвообразователей, формируют гумусодержащий слой, повышают плодородие и устойчивость почвы. Из литературных источников известен сорбент для химической очистки почв, в виде суспензии, состоящий из 93% гуминовых кислот и оксидов алюминия, железа и кремния. Исходным сырьем для производства данного сорбента является лигнит (от лат. *lignum* — «дерево, древесина») – разновидность слабоуглефицированного бурого угля, с содержанием углерода до 75% [1].

Более эффективными считаются биологические сорбенты третьего поколения, содержащие в своём составе почвенные микроорганизмы. Современные сорбенты для эффективного восстановления техногенных почв должны быть полифункциональными, сочетать в себе fungicidные, ростостимулирующие и адаптогенные свойства. В микробиоценозе мерзлотных почв северных территорий, где в основном и расположены нефтедобывающие предприятия, загрязняющие земли, преобладают почвенные штаммы бактерий рода *Bacillus subtilis* с уникальным комплексом антагонистических и ферментных свойств, которые чаще применяются в современной биотехнологии.

В ходе исследований был синтезирован комплексный сорбент, содержащий



Таблица. Содержание компонентов в композиции природного сорбента и его основные свойства

Table. The content of the components in the composition of the natural sorbent and its main properties

Компонент сорбента	Свойства (функции) сорбента	Содержание, мас. %
Супесь, песок с примесью глины (3-10%)	Разрыхлитель, улучшение аэрации почвы.	60
Наноглина, фр. <i>Montmorillon</i> ($\text{Na,Ca}_{0,33}(\text{Al,Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)	Влагоудержание, способность к сильному набуханию, ярко выраженные сорбционные свойства. При очистке углеводородов выступает в роли катализатора, ускоряющего расщепление тяжёлых углеводородов, и адсорбента, задерживающего вредные примеси	20
Лигнин технический, от лат. <i>lignum</i>	Источник питательных органических веществ, улучшение аэрации, связывания и удержания влаги.	9
Сухой торф низинный, англ. <i>low moor peat</i>	Источник питательных органических веществ, улучшение аэрации, связывания и удержания влаги.	9
Моноаммоний-fosfat ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	Азотно-фосфорное удобрение, отвечающее за питание азотом, фосфором и калием. Азот способствует росту зелёной массы, фосфор участвует в процессах энергоснабжения растений	2
Почвенные бактерии, лат. <i>Bacillus subtilis</i>	Устойчивы к негативным воздействиям: высушивание и экстремальные температуры, воздействие химических препаратов Вещества, выделяемые в окружающую среду почвенными микроорганизмами <i>Bacillus</i> , действуют и как антибиотики, и как натуральное удобрение, увеличивая плодородие почв (даные Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений). Углеводородокисляющие микроорганизмы, которые используют углеводороды в качестве источника углерода и энергии	$3 \cdot 10^9$, кл/г, концентрация в сорбенте

кроме «древесных компонентов» – почвенные бактерии *Bacillus subtilis*, увеличивающие плодородие повреждённых почв и участвующие в окислении и деградации нефти и её производных. Исходным сырьем для производства данного сорбента являлись лигнин технический, торф, лигнит (от лат. *lignum* — «дерево, древесина») – разновидность слабоуглефицированного бурого угля, с содержанием углерода до 75%. Композиция природного сорбента приведена в таблице.

Композиция, полученного сорбента, моделирует образец почвы природного

естественного состава, в котором жизнедеятельность бактерий будет сохраняться в природных естественных условиях самое продолжительное время. На рис. 3 показан внешний вид комплексного природного биосорбента.

Эффективность разработанного сорбента проводилась в лабораторных условиях на ростках травянистых цветковых растений семейства *Poaceae*, рода *Secale cereale* – рожь культурная. Именно этот род растений наиболее массово культивируется на территории Российской Федерации.

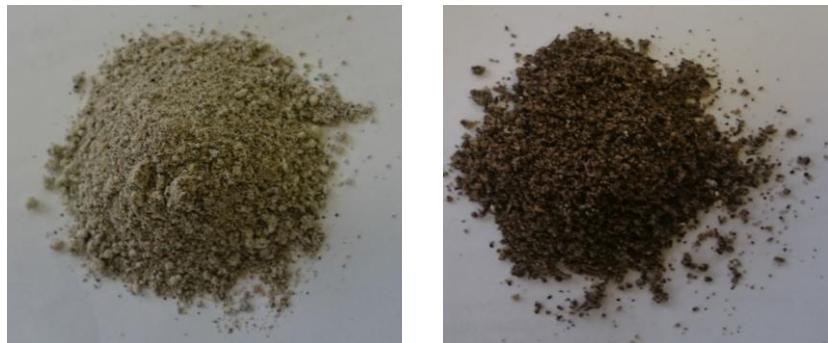


Рис. 3. Внешний вид комплексного природного сорбента (слева) и готового препарата с почвенными бактериями *Bacillus subtilis* (справа)

Fig. 3. The appearance of a complex natural sorbent (left) and a finished preparation with soil bacteria *Bacillus subtilis* (right)

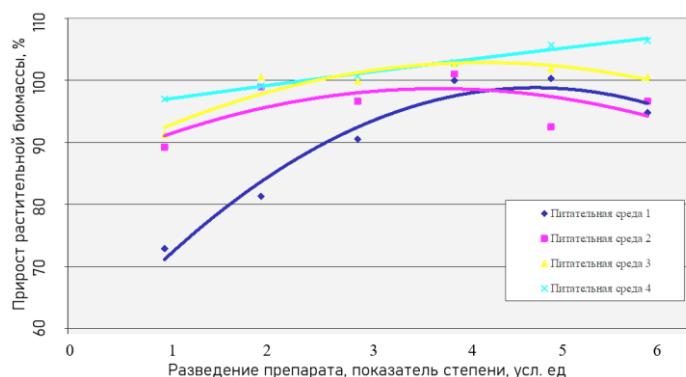


Рис. 4. Графическая зависимость прироста массы растений от состава и степени разведения препарата

Fig. 4. Graphical dependence of plant weight gain on the composition and degree of dilution of the preparation

Оптимальный состав композиции сорбента для исследованных образцов почв приведён в Таблице. Преимущества данного сорбента состоят в том, что в зависимости от природных условий, состояния повреждённой почвы, разновидности токсикантов и др. факторов, его состав может меняться. Полученные результаты показывают, что комплексный биосорбент эффективно влияет на увеличение прироста зелёной массы (в %) экспериментальных лабораторных посевов ржи.

На рисунке 4 видно, что эффективность сорбента увеличивается с увеличением степени разведения препарата и выходит на максимум в области прироста зелёной биомассы растений в 110 % со степенью разведения 5-6 усл. ед.

Заключение

Можно сделать вывод, что комплексный биосорбент, содержащий природные компоненты в том числе лигнин, торф и др. компоненты показал свою хорошую эффективность в лабораторных исследованиях при ремедиации на образцах нефтезагрязнённых почв. Он имеет вид однородного порошка тёмно-коричневого цвета. Сорбент нетоксичен (IV класс опасности), не нарушает экологического равновесия в экосистемах, безвреден для человека, для естественных природных почв является их структурообразователем. При внесении на поверхность почвы не обладает парусностью, продолжительное время сохраняет свои характеристики.



Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые

Список литературы/References

1. Lotosh V.E. Pererabotka otxodov prirodopol'zovaniya. Ekaterinburg: Poligrafist, 2007. 503 p. (In Russ.)
2. Antonova N.B., Tumanova N.A. *Probl. okruzhayushhej sredy` i prirod. resursov.* 1994; 2: 88-94. (In Russ.)
3. Ris Dzh., E'llis B. *Ximiya v interesax ustojchivogo razvitiya.* 1993; 2: 281-288. (In Russ.)
4. Heng, I. *Chem. Eng (USA).* 1998; 1: 23. (In Russ.)

могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

5. Egorov N.S. *Praktikum po mikrobiologii.* M.: MGU, 1976: 61-65. (In Russ.)
6. Lajoie G., Layton A.C., Sayler G.S. Pat. 5618728 (USA). Priority 6.03.1995. Published 8.04.1997.
7. Lanoe J. *Petrole et techn.* 1996; 405: 74-76.
8. Lajoie G., Layton A.C., Sayler G.S. Pat. 5618728 (USA). Priority 6.03.1995. Published 8.04.1997.
9. Dehrmann T., Bege D., Moricet M., Gottschlich H. *Application 4111868* (Germany). Priority 11.04.1991. Published 15.10.1992

Информация об авторах / Information about the authors

И.А. Козлов – к.х.н., старший научный сотрудник ИФХЭ РАН, Москва, Россия

I.A. Kozlov – PhD in Chemistry and a senior researcher at the Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

В.А. Мамонов – инженер 1 категории, ИФХЭ РАН, Москва, Россия

V.A. Mamonov – Category 1 Engineer, Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 18.11.2025; одобрена после рецензирования 07.12.2025; принята к публикации 17.12.2025.

The article was submitted 18.11.2025; approved after reviewing 07.12.2025; accepted for publication 17.12.2025.