



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

АГРОБИ ТЕХНОЛОГИИ

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

МАТЕРИАЛЫ

МЕЖДУНАРОДНОЙ
МОЛОДЕЖНОЙ НАУЧНОЙ
ШКОЛЫ

«РЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ: ИННОВАЦИОННЫЕ
ПОДХОДЫ К ВОССТАНОВЛЕНИЮ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ»

МОСКВА 2023



270 МГУ
1755  2025

Материалы молодежной научной школы
РЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ: ИННОВАЦИОННЫЕ
ПОДХОДЫ К ВОССТАНОВЛЕНИЮ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

28-31 августа 2023, Москва,
МГУ имени М.В.Ломоносова

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL
YOUTH SCIENCE SCHOOL:
"SOIL REMEDIATION: INNOVATIVE APPROACHES
TO RESTORING ECOLOGICAL FUNCTIONS"

28-31 August 2023, Moscow
Lomonosov Moscow State University

Москва – 2023

УДК 574/577(063)
ББК 28л0

Ремедиация почв: инновационные подходы к восстановлению экологических функций: материалы Международной молодежной научной школы (Москва, 28-31 августа 2023 г.), Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва: Постер-М, 2023 - 252 с.

Рецензенты

Е.Н. Пакина - доктор с.-х. наук, профессор, директор Агробиотехнологического департамента Аграрно-технологического института РУДН

С.Ю. Селивановская - доктор биол. наук, профессор, директор Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета

Ответственные редакторы

Терехова В.А., д.б.н.; Кулачкова С.А., к.б.н.; Ковалева Е.И., к.б.н.;
Морачевская Е.В., к.б.н.

Редакционная коллегия

Рахлеева А.А., к.б.н.; Якименко О.С., к.б.н.; Федосеева Е.В., к.б.н.;
Кыдралиева К.А., д. х.н.; Деревенец Е.Н., Дзеранов А.А., Прудникова Е.В.;
Копельчук Н.А., Козлов И.А.

ISBN 978-5-6049991-8-9

DOI: 10.61271/m2951-7818-4458-g

Сборник содержит материалы участников молодежной школы «Ремедиация почв: инновационные подходы к восстановлению экологических функций», посвященной 270-летию Московского университета. Школа как часть большого научного форума «Агробиотехнологии: достижения и перспективы развития» предоставила возможность обсудить актуальные проблемы оценки и восстановления почв, нарушенных в результате природных и техногенных воздействий. Студенты, аспиранты и молодые ученые из разных уголков России и из зарубежных стран представили результаты своих исследований и разработок в докладах и прослушали открытые лекции ведущих ученых.

Сборник содержит 39 статей, 2 кратких тезиса и 1 аннотацию докладов. Всего 93 автора публикаций.

Ключевые слова: почвы, антропогенное воздействие, поллютанты, ремедиация, инновационные подходы, фармпрепараты, наноматериалы, углеродсодержащие препараты, полимерные комплексы

The volume contains materials from participants of the Youth School, "Soil Remediation: Innovative Approaches to Restoring Ecological Functions," dedicated to the 270th anniversary of Moscow University. The School, as part of the extensive scientific forum, "Agrobiotechnologies: Achievements and Development Prospects", provided an opportunity to discuss topical issues concerning the assessment and restoration of soils disturbed due to both natural and anthropogenic impacts. Students, postgraduates, and young scientists from various parts of Russia and foreign countries presented the results of their research and development in reports and attended open lectures by leading scientists. The volume comprises 39 articles, 2 short abstracts, and 1 abstract of reports. There are 93 authors for the publications.

Keywords: soil, anthropogenic impact, pollutants, remediation, innovative approaches, pharmaceuticals, nanomaterials, carbon-containing ameliorants, and polymer complexes

**Материалы молодежной научной школы
Ремедиация почв: инновационные подходы
к восстановлению экологических функций**

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
О международном сотрудничестве и SETAC	8
International cooperation and SETAC.....	10
Материалы молодежной научной школы.....	12
Аннотации докладов и краткие тезисы	234
Финансовые партнеры	239
Информационные партнеры форума	248
Авторский указатель	250

ПРЕДИСЛОВИЕ



Одним из мероприятий Международного форума «Агробиотехнологии: достижения и перспективы развития» стала молодежная научная школа «Ремедиация почв: инновационные подходы к восстановлению экологических функций», в которой приняли участие студенты, аспиранты и молодые ученые из разных уголков России и ряда зарубежных стран. Главным организатором школы выступил факультет почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова, который в 2023 году отмечает свое 50-летие. Уникальностью нашего факультета является фундаментальное образование в области почвоведения и экологии. Подчеркивая тесную взаимосвязь данных дисциплин в процессе обучения и научных исследований, организаторы посвятили молодежную научную школу вопросам изучения экологических функций и ремедиации почв.

Свой вклад в решение экологических задач, изучение и сохранение почвенных ресурсов вносят молодые исследователи из разных ВУЗов нашей страны, которым важно делиться своими результатами и получать обратную связь не только от научного сообщества, но и от индустрии. Молодежная научная школа – это уникальная возможность для нас, студентов, аспирантов и молодых ученых, расширить свои знания и навыки, а также установить контакты с профессионалами и экспертами в данной области.

Соорганизатором школы выступило Студенческое научное общество (СНО) факультета почвоведения МГУ – объединение студентов, занимающихся научно-исследовательской, инновационной, научно-просветительской деятельностью в области экологии и почвоведения. Направления деятельности СНО нашего факультета включают:

- оказание поддержки студентам при выполнении научно-исследовательской работы;
- повышение информированности о научных мероприятиях и карьерных возможностях;

- развитие междисциплинарного межвузовского сотрудничества;
- образование на факультете научно-ориентированного студенческого сообщества.

Члены нашего СНО активно развивают экологические проекты и исследования, показывают роль и значимость экологии как междисциплинарной области знаний. В 2022-2023 учебном году мы провели кейс-чемпионат по снижению углеродного следа логистической компании «ReFresh Logic», «Школу молодых почвоведов» совместно с Почвенным институтом имени В.В. Докучаева, Всероссийский студенческий форум «Эко.Континуум» при участии ФЭО Госкорпорации «Росатом», выпустили сборник для студентов младших курсов “Кафедры – для науки и карьеры”, приняли участие в организации секции «Почвоведение» Международного молодежного форума «Ломоносов-2023».

Желаем молодым исследователям не упускать возможности для знакомств с коллегами, обсуждения собственных инициатив и разработок и дальнейшего их внедрения в практику!

С наилучшими пожеланиями,

Председатель СНО МГУ, Председатель СНО
факультета почвоведения МГУ
Елизавета Деревенец

Контакты для связи со СНО факультета почвоведения МГУ:
https://vk.com/sno_pochva_msu,
E-mail: soil.sno.msu@yandex.ru

Dear colleagues,

The Youth Scientific School, "Soil Remediation: Innovative Approaches to Restoring Ecological Functions," was one of the events at the International Forum, "Agrobiotechnologies: Achievements and Development Prospects." Many students, postgraduates, and young scientists from different parts of the country participated in the conference. The main organizer of the scientific school is the Faculty of Soil Science at Lomonosov Moscow State University, which celebrated its 50th anniversary in 2023. The fundamental education in the field of soil science and ecology is the uniqueness and main specificity of our faculty. The Youth Scientific School was dedicated to the study of ecological functions and remediation of soils, emphasizing the close relationship between these disciplines in the process of education and scientific research.

Young researchers from various universities across the country contribute to solving environmental problems, studying, and preserving soil resources. It is important for them to share their results and receive feedback from the scientific community, as well as from industrial partners. The Youth Scientific School offers a unique opportunity for us, students, postgraduates, and young scientists, to expand our knowledge and skills and establish contacts with professionals and experts in this field.

The Student Scientific Society (SSS) of the Faculty of Soil Science at Moscow State University is an association of students engaged in research, innovation, scientific, and educational activities in the field of ecology and soil science; it also became a co-organizer of the school. The activities of the SSS at our faculty include:

- Providing support to students in conducting research work.
- Raising awareness of scientific events and career opportunities.
- Developing interdisciplinary interuniversity cooperation.
- Nurturing a science-oriented student community at the faculty.

The members of the SSS actively develop environmental projects and research, demonstrating ecology as an interdisciplinary

field of knowledge. In the 2022-2023 academic year, we organized a case championship on reducing the carbon footprint of the logistics company "ReFresh Logic," the "School of Young Soil Scientists" in collaboration with the V.V. Dokuchaev Soil Institute, and the All-Russian Student Forum "Eco.Continuum" with the participation of the Federal Environmental Operator State Corporation "Rosatom." We also published a volume for junior students titled "Departments – For Science and Career" and took part in organizing the "Soil Science" section of the International Youth Forum "Lomonosov-2023."

We encourage young researchers not to miss opportunities to meet colleagues, discuss their initiatives and developments, and further their implementation in practice!

With best wishes,

Chairman of the MSU SSS, Chairman of the MSU
Faculty of Soil Science SSS
Elizaveta Derevenets

Contact Information:

https://vk.com/sno_pochva_msu,
E-mail: soil.sno.msu@yandex.ru

О МЕЖДУНАРОДНОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ И SETAC



Молодёжные научные школы под эгидой Общества экотоксикологии и химии окружающей среды (SETAC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry) стали традиционными для русскоязычных участников с 2014 г. Успешными и интересными были они в Москве (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, 2014, 2018), Красноярске (Сибирский федеральный университет, 2021), Бишкеке (Международная высшая школа медицины, Киргизия, 2022), на озере Иссык-куль (Международный университет Кыргызстана, 2022), в Сургуте (Сургутский государственный университет, 2023). Как и все мероприятия SETAC, молодежные научные школы представляют собой междисциплинарный форум студентов, представителей академических кругов, бизнеса и управленческих структур. Как правило, они включают лекции, мастер-классы ведущих специалистов и доклады молодых ученых, сопровождающиеся активными дискуссиями. Молодежная научная школа «Ремедиация почв: инновационные подходы к восстановлению экологических функций» в рамках Международного форума «Агробиотехнологии: достижения и перспективы развития» следует такому же формату.

Общество экотоксикологии и химии окружающей среды SETAC – крупнейшая международная некоммерческая профессиональная организация экологов. В настоящее время в состав SETAC входит более 6000 членов из научных, бизнес структур, государственных органов, образовательных учреждений большинства развитых стран мира. Основная задача общества — развитие научных исследований с целью предотвращения или минимизации загрязнения окружающей среды и других видов экологических стрессов.

Региональное русскоязычное отделение Общества SETAC RLB (SETAC Russian Language Branch) образовано в 2013 г. как информационное пространство для общения и обмена опытом научных исследований в сфере экологии. Как и другие отделения, оно способствует объединению усилий ученых и практиков

экологов с целью внедрения научно-обоснованных принципов рационального использования природных ресурсов и сохранения нашей планеты.

Общество SETAC предоставляет большие возможности для обсуждения и содействия применению научных знаний в реализации экологической политики. Это особенно важно для научной молодежи, стремящейся к расширению сферы своих профессиональных контактов и реализации академических знаний. Региональное отделение SETAC RLB способствует регулярным встречам специалистов и интеграции знаний экологов, как в рамках СНГ, так и в мировом научном сообществе. SETAC RLB способствует поиску партнеров и реализации совместных международных научных проектов.

Что дает членство в SETAC для научной молодежи?

- Доступ к студенческим платформам SETAC GLOBE: карьерный рост, участие в научных дискуссиях, поиск единомышленников.
- Экспертную поддержку проектов, возможность обсудить свои исследования.
- Возможность получения грантов на участие в международных конференциях, в том числе на регулярных встречах молодежи YES - Young Environmental Scientists.
- Огромные возможности для новых знакомств по всему миру и путешествий.

Подробнее о SETAC на сайте [https:// setac.org](https://setac.org)

Президент Русскоязычного отделения международного
Общества экотоксикологии и химии окружающей среды

SETAC RLB

проф., д.б.н. Худайбергенова Б.М
russiansetac@gmail.com.

INTERNATIONAL COOPERATION AND SETAC

Youth scientific schools under the auspices of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) have become traditional for Russian-speaking participants since 2014. Successful and interesting Schools were held in Moscow (Lomonosov Moscow State University, 2014, 2018), Krasnoyarsk (Siberian Federal University, 2021), Bishkek (International Higher School of Medicine, Kyrgyzstan, 2022), on Lake Issyk-Kul (International University of Kyrgyzstan, 2022), in Surgut (Surgut State University, 2023). Like all SETAC events, Youth Science Schools are an interdisciplinary forum of scientists and students, business and government. As a rule, they include lectures, master classes by leading experts and reports by young scientists, accompanied by active discussions. The Youth Scientific School "Soil Remediation: Innovative Approaches to Restoring Ecological Functions" followed the same format within the framework of the International Forum "Agrobiotechnologies: Achievements and Development Prospects".

SETAC is the largest international non-profit professional organization for environmentalists. Currently, SETAC includes more than 6,000 members from academic and business structures, government agencies, educational institutions from many countries of the world. The main goal of the society is the development of scientific research to prevent or minimize environmental pollution and other types of environmental stress.

The regional Russian-language branch of the Society SETAC RLB (SETAC Russian Language Branch) was organized in 2013 as an information space for communication and exchange of experience in scientific research in the field of ecology. Like other departments, it contributes to the unification of the efforts of environmental scientists and practitioners in order to implement science-based principles for the rational use of natural resources and the preservation of our planet.

SETAC provides a great opportunity to discuss and promote the application of scientific knowledge in the implementation of environmental policy. This is especially important for young scientists who are striving to expand the scope of their professional contacts and the implementation of academic knowledge. The regional branch of SETAC RLB promotes regular meetings of specialists

and the integration of environmentalists' knowledge, both within the CIS and in the global scientific community. SETAC RLB promotes the search for partners and the implementation of joint international scientific projects.

What does membership in SETAC provide for scientific youth?

Access to SETAC GLOBE student platforms: career growth, participation in scientific discussions, search for like-minded people

- Expert support for projects, the opportunity to discuss your research
- Opportunity to receive grants to participate in international conferences, including regular youth meetings YES - Young Environmental Scientists
- Huge opportunities for new acquaintances around the world and travel

Learn more at <https://setac.org>

President of the Russian-language branch of the International
Society for Ecotoxicology and Environmental Chemistry
(SETAC RLB)

Prof. Bermet Khudaibergenova
russiansetac@gmail.com

МАТЕРИАЛЫ МОЛОДЕЖНОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИОЧАРА С ЦЕЛЬЮ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПОДДЕРЖАНИЯ УСТОЙЧИВОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОБНОГО СООБЩЕСТВА ПОЧВ АГРОЦЕНОЗОВ

Авдулов Д.А., Костина Н.В.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, г. Москва, Россия
Dark77rus@yandex.ru*

В настоящее время почвы по всему миру испытывают интенсивную антропогенную нагрузку, являясь неотъемлемой частью множества форм хозяйственной деятельности, предметом земельных отношений, источником экосистемных услуг, а также невозобновляемым природным ресурсом. Одна из важнейших функций почвы – плодородие – активно и практически безальтернативно используется человеком для получения продуктов питания. Однако почва, будучи открытой системой, требует постоянного соблюдения состояния термодинамического равновесия, потеря которого влечёт деградацию основных функций почвы, в т.ч. и плодородия. В практике современного и эффективного сельского хозяйства невозможно обойтись без негативных последствий для почвы в целом и её микробиома в частности. С урожаем из почвы выносятся макро- и микроэлементы, при обработке посевов используются ксенобиотики, представленные различными видами пестицидов, происходит постепенная деградация физических характеристик почвы [1]. «Внешний эффект» таких воздействий проявляется в сокращении объемов урожая, однако существует и «внутренний эффект», который проявляется в виде негативной трансформации почвенного микробиоценоза, который, в свою

очередь, является переходным звеном между почвенным плодородием и растением за счёт высвобождения микроэлементов из почвенных минералов, минерализации углерода и азота из гумусовых веществ, а также обеспечивающий диазотрофию и образование фитогормонов [2]. Воздействие биочара на почвенный микробиом на данный момент находится на стадии активного изучения. Пористая структура, гибкость химических и физических характеристик в зависимости от сырья и условий производства делают этот мелиорант перспективным продуктом для улучшения состояния почвенного микробного сообщества посредством увеличения доступной для микробной адгезии площади поверхности в почве, изменения рН, содержания в почве зольных элементов и др. [3].

Объектами исследования в данной работе являются пахотные почвы из трёх субъектов РФ: Астраханской, Белгородской и Московской областей. Отбор проб производился в 2021 году. Образцы были представлены тремя типами почв: аллювиальными, черноземами, дерново-подзолистыми соответственно. Биочар для эксперимента был предоставлен компанией «Райс Хаск Технологии». Сырьё, из которого производился продукт, представлено рисовой лузгой. В почве проводилась оценка активности процессов микробной трансформации соединений азота и углерода: потенциальная и актуальная активность азотфиксации, денитрификации, эмиссии CO_2 и метаногенеза (эмиссии метана) методами газовой хроматографии [4, 5]. Также были определены численность прокариотов методом прямой люминесцентной микроскопии [5] и функциональное разнообразие микробоценоза методом мультисубстратного тестирования [6, 7]. Статистический анализ, включающий в себя сравнение средних по t-критерию, дисперсионный анализ и их непараметрические аналоги при $p < 0,1$, $p < 0,05$ [8] выполнялся в программе StatSoft Statistica. Исследование проводилось в виде модельного эксперимента протяжённостью в 60 дней с целью изучения всех вышеуказанных параметров в ходе почвенной микробной сукцессии, инициированной увлажнением. Для проведения эксперимента в пластиковые вегетационные сосуды вносилось по 100 г воздушно-сухой почвы. Для каждого типа почв использовалось 12 сосудов, в половину из которых вносили биочар в дозе, соответствующей 5 т/га, увлажняли дистиллированной водой до 70% от полной влагоемкости, накрывали крышками для вентиляции

и инкубировали в тёмном месте при температуре 24°C, при постоянном контроле влажности по массе микрокосмов. Далее, с первых суток после начала инкубации, каждую неделю часть вегетационных сосудов изымали для проведения пробоотбора для анализов.

Было отмечено значимое воздействие биочара на все исследуемые процессы микробной трансформации азота, интенсивность дыхания почвы, численность микроорганизмов и показатели функционального разнообразия почвенного микробсообщества. Максимальное влияние мелиоранта на процессы азотного цикла отмечено в чернозёме: 3-7 кратное увеличение потенциальной азотфиксации сочетается с 1,5-3 кратным сокращением как актуальной, так и потенциальной денитрификации. Аналогичный, но менее выраженный эффект наблюдался в результатах исследований для дерново-подзолистой почвы. В этих почвах возможно накопление биологического азота в агроценозах за счет стимуляции азотфиксации и снижения его газообразных потерь в процессе денитрификации. При исследовании этих процессов в аллювиальной почве значимых различий между вариантами практически не наблюдалось. При внесении биочара в чернозём происходило значимое сокращение актуального дыхания почвы до 3 раз, также до 2,5 раз сокращалась потенциальная эмиссия CO₂ в дерново-подзолистой почве. Как и для процессов азотного цикла, влияние мелиоранта на почвенное дыхание в аллювиальной почве не наблюдалось. Нами не обнаружен статистически значимый эффект биочара на активность метаногенеза во всех исследуемых почвах. Численность прокариотов значительно увеличивалась под воздействием выбранной дозы биочара во всех исследуемых почвах, однако этот эффект наблюдался на разных стадиях сукцессии. В чернозёме на последней стадии сукцессии наблюдался почти трехкратный прирост численности прокариот (до 6 млрд кл/г против 2,2 млрд в контрольном образце), а в дерново-подзолистой и аллювиальной почве при внесении мелиоранта прирост численности прокариот в 1,5-2 раза отмечался на начальных этапах модельного эксперимента. Мультистратное тестирование является относительно новым и крайне перспективным способом оценки функционального разнообразия микробсообщества. Во всех исследуемых почвах при внесении биочара основные оцениваемые показатели изменились в лучшую с точки зрения устойчивости эко-

системы сторону. Увеличилось количество потребляемых тест-субстратов и метаболическая активность, в то время как коэффициент рангового распределения d , характеризующий устойчивость микробсообщества к внешним воздействиям, стабильно принимал значения ниже, чем те, что наблюдались в контрольных образцах, что свидетельствует об увеличении устойчивости микробного комплекса. Все эффекты имели прогрессивную динамику в ходе микробной сукцессии. Несмотря на полученные и полезные с практической точки зрения данные, по-прежнему достаточно сложно предположить механизм влияния мелиоранта на сообщество почвенных микроорганизмов. В качестве основных факторов выделяют повышение доступности питательных веществ (макро- и микроэлементы), использование поверхности мелиоранта для адгезии, изменение водного режима почвы и pH [3, 9].

Полученные данные характеризуют исследованный биочар как достаточно полезный почвенный мелиорант, использование которого в черноземах и дерново-подзолистых почвах может привести к накоплению (или сокращению газообразных потерь) таких важных для растениеводства нутриентов как азот и углерод; во всех исследованных видах почв биочар можно использовать для стабилизации почвенного микробсообщества с помощью увеличения его функционального разнообразия и общей численности прокариотов.

Литература

1. FAO. Status of the World's Soil Resources: Main Report. Publisher: FAO, Rome, 2015.
2. Hartmann M., Six J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. // Nature Reviews Earth & Environment. 2023. V.4. P. 4-18.
3. Li X., Wang T., Chang S.X., Jiang X., Song Y. Biochar increases soil microbial biomass but has variable effects on microbial diversity: A meta-analysis. // Science of the Total Environment. 2020. V.749.
4. Степанов А.Л., Лысак Л.В. Методы газовой хроматографии в почвенной микробиологии. МАКС пресс. М. 2002.
5. Методы почвенной микробиологии и биохимии: / Под ред. Звягинцева Д.Г. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991.

6. Горленко М.В., Кожевин П.А. Дифференциация почвенных микробных сообществ с помощью мультисубстратного тестирования // Микробиология. 1994. Т. 63 (2).
7. Методика выполнения измерений интенсивности потребления тест-субстратов микробными сообществами почв и почвоподобных объектов фотометрическим методом: ФР.1.37.2010.08619; ПНД Ф Т 16.1.17-10. М., 2010.
8. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. Изд. ЛКИ. 2009.
9. Zhang Q., Xiao J., Xue J., Zhang L. Quantifying the Effects of Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils: A Global Meta-Analysis. // Sustainability. 2020. V. 12.

ВЛИЯНИЕ МЕЛИОРАНТОВ НА ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ ОКРЕСТНОСТЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Алексеевко Д.Д.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
dankrov1999@gmail.com*

Предприятия цветной металлургии оказывают высокую техногенную нагрузку на окружающую среду, посредством загрязнения её тяжёлыми металлами (ТМ), а также другими побочными продуктами процессов плавки и обогащения руд. Основными загрязняющими веществами в районе комбината являются ТМ, а именно никель, кобальт и медь. Однако, помимо этого в процессе плавки и обогащения местных сульфидных руд образуется большое количество побочного продукта в виде соединений серы, которые складываются в отвалы и подвержены размыванию водными потоками во время дождей и таяния снегов, а также раздуванию ветрами.

Проблемы загрязнения почв в ходе деятельности предприятий цветной металлургии разрабатываются довольно давно [3, 6, 11]. Вопросам, связанным с подвижностью тяжёлых металлов в почвах также посвящено множество трудов [1, 2, 4, 10], кроме того конкретно по северным почвам накоплено немало работ [7, 9]. На данный момент разработаны различные подходы к рекультивации почв, однако для загрязнённых почв окрестностей комбината разработки ещё не завершены.

Целью данной работы является оценка перспективности применения различных мелиорантов для рекультивации загрязнённых почв окрестностей металлургического комбината. Для этого были поставлены задачи: выбор мелиорантов, расчёт вносимых концентраций, постановка модельного эксперимента, определение содержания водорастворимых форм ТМ и серы методом ИСП-МС в исходных образцах и после обработки, а также определение фитотоксичности, базального дыхания методом кислотно-основного титрования, выделения SO_2 .

Объектами исследования являются пробы почв подбур, торфяно-глеезёма и глеезёма, отобранные на небольшом удалении от металлургического комбината в июле 2022 года. В качестве мелиорантов были выбраны: CaO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и гуминовый препарат «Экобиосфера Органик Плюс». Вносимые концентрации CaO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ были рассчитаны на основе определения кислотно-основной буферности почв, так как в составе реагента CaO_2 содержится 48% $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Для гуминового препарата расчёт был произведён по формуле, предоставляемой производителем, основанной на содержании ТМ для каждой почвы отдельно. Все мелиоранты вносились по отдельности, каждый в 3 повторностях.

Исходя из полученных значений кислотно-основной буферности каждой из отобранных почв, было решено вносить CaO_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ только в подбур. Также в подбур была внесена 1 доза гуминового препарата. В случае с торфяно-глеезёмом и глеезёмом вносились 0,5; 1 и 3 дозы гуминового препарата. Для каждой почвы были контрольные образцы в 3 повторностях. Эксперимент проводился в пластиковых емкостях с герметичной крышкой в течение 34 дней. Почва была увлажнена примерно до 80% от полной влагоёмкости, то есть близкому к естественному для неё состоянию. В емкости были помещены стаканчики с щелочью (NaOH) для поглощения выделяющегося CO_2 и SO_2 , которые были заменены свежими на 13 день.

На 34 день экспозиции ёмкости были открыты и оставлены на сушку в течение 10 сут до воздушно сухого состояния. После высыхания образцов до воздушно сухого состояния они были перетёрты фарфоровым пестиком до пыли. Затем было проведено определение влажности каждого образца путём высушивания в сушильном шкафу при 105°C [5].

Для проведения анализа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и фитотестирования, были приготовлены водные вытяжки в соотношении почва:вода 1:10. Полученные растворы были проанализированы методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе PlasmaQuant MS Elite (Analytic Jena) для определения содержания различных тяжёлых металлов.

Измерение накопленных сульфатов в ходе эмиссии сернистого газа проводилось в 10 кратно разбавленном растворе 0,5M NaOH , который сорбировал диоксид серы во время экспозиции

эксперимента. Анализ проводился при помощи ионного хроматографа ICS-2000 Dionex.

Фитотестирование проводилось путём высаживания по 25 семян кресс-салата в чашках Петри на фильтр «белая лента», смоченный 10 мл ранее полученной водной вытяжки. Кроме чашек Петри с водной вытяжкой были заложены 3 контрольные повторности с дистиллированной водой. Проращивание семян проходило при комнатной температуре в тёмном месте на протяжении 7 суток. Затем был проведен подсчёт проросших семян и измерение длины их корней в каждой чашке Петри. По полученным данным был проведён расчёт величины эффекта торможения [8].

По полученным данным был проведён однофакторный дисперсионный анализ с уровнем значимости 0,05 для определения значимости влияния мелиоранта на исследуемые параметры почвы.

В результате проведённых анализов исследуемых образцов подбур, торфяно-глеезёма и глеезёма различными методами были получены данные о значениях рН, базального дыхания, эмиссии сернистого газа. А также были получены данные о содержании различных ТМ, таких как: никель, кобальт, медь. Кроме того, было проведено фитотестирование на водных вытяжках.

Таблица 1. Результаты эксперимента с подбором

	рН	C-CO ₂ , % снижения	S-SO ₂ , % снижения	Ni, % снижения	Co, % снижения	Cu, % снижения	Тормо- жение, %
Подбур КОНТР	5,88	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	50,9
Подбур Ca(OH) ₂	7,09	148,92	77,71	9,21	5,98	12,71	-29,4
Подбур CaO ₂	7,59	193,00	44,15	6,18	4,05	13,81	-15,9
Подбур Гумат 1 доза	6,14	100,95	145,42	89,90	90,86	79,03	52,3

Было установлено, что для органогенного горизонта 0-5 см подбур иллювиально-гумусового (табл. 1) наиболее эффективным по совокупности факторов показал себя пероксид кальция. Его внесение повысило интенсивность базального дыхания по сравнению с контрольным образцом на 93%. По сравнению с гидроксидом кальция на 23%, что по результатам статистической обработки не является статистически значимым отличием.

Вариант с внесением гуминового препарата не оказал значимого влияния по сравнению с контрольным образцом. По приведённым данным можно судить о благоприятном влиянии пероксида кальция на жизнедеятельность почвенных микроорганизмов. Кроме того, по результатам фитотестирования пероксид кальция снизил эффект торможения по сравнению с контрольным образцом на 67% и тем самым показал стимулирующее действие на рост семян.

Кроме того, пероксид кальция, по-видимому, снизил эмиссию сернистого газа по сравнению с контрольным образцом на 56%, с вариантом внесения гидроксидом кальция на 43% и на 70% по сравнению с вариантом с внесением гуминового препарата. Это, вероятно, свидетельствует об эффективном связывании сернистого газа в малоподвижную форму – гипс. Данный эффект говорит о возможности применения пероксида кальция для ремедиации почв, загрязнённых соединениями серы.

Внесение данного мелиоранта способствовало снижению подвижности тяжёлых металлов (ТМ). По сравнению с контрольным образцом, в среднем для никеля, кобальта и меди снижение составило 90%. В сравнении с вариантом внесения чистого гидроксида кальция, вариант с внесением пероксида оказался эффективнее в среднем для никеля и кобальта на 30%. Внесение же гуминового препарата не оказало значимого влияния на переход ТМ в водную вытяжку, но, судя по снижению эффекта торможения роста семян, при внесении гуматов ТМ переходят в водную вытяжку, по-видимому, в составе комплексов с гуминовыми веществами.

Таблица 2. Результаты эксперимента с торфяно-глеезёмом

	pH	C-CO ₂ , % снижения	S-SO ₂ , % снижения	Ni, % снижения	Co, % снижения	Cu, % снижения	Тормо- жение, %
Торфяно-глеезём КОНТР	6,67	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	41,9
Торфяно-глеезём Гумат 0,5 дозы	7,07	95,62	92,34	55,39	37,24	45,37	-42,2
Торфяно-глеезём Гумат 1 доза	6,99	115,25	79,40	60,15	39,47	61,40	-48,9
Торфяно-глеезём Гумат 3 дозы	6,66	91,07	55,35	79,81	82,70	81,86	21,3

В случае органогенного горизонта 0-5 см торфяно-глеезёма потечно-гумусового (табл. 2) вносился только гуминовый препарат в различной кратности дозы. Так было установлено, что наиболее эффективной является 1 доза гуминового препарата «Экобиосфера Органик Плюс». Его внесение повысило интенсивность базального дыхания на 15% в сравнении с контрольным образцом. Также при внесении 1 дозы гуминового препарата снизилась эмиссия сернистого газа по сравнению с контрольным образцом на 21%, и на 14% по сравнению с 0,5 дозы. Однако три дозы оказались эффективнее одной дозы на 30%.

Кроме того, одна доза гуминового препарата показала свою эффективность по снижению подвижности водорастворимых форм тяжёлых металлов. По сравнению с контрольным образцом наблюдалось снижение на 40% в среднем для никеля, кобальта и меди. Три дозы гуминового препарата показали себя хуже и произошло снижение только на 25% по сравнению с вариантом внесения одной дозы. Половина дозы не оказала значимого эффекта на подвижность ТМ.

Таким образом, была показана эффективность применения одной дозы гуминового препарата «Экобиосфера Органик Плюс» для рекультивации почв, загрязнённых ТМ и соединениями серы. Применение данного мелиоранта в умеренных количествах не оказывает негативного влияния на окружающую среду и живые организмы, что показано результатами фитотестирования. Так, вариант с внесением одной дозы гуминового препарата снизил эффект торможения по сравнению с контрольным образцом на 91% и способствовал росту семян.

Таблица 3. Результаты эксперимента с глеезёмом

	pH	C-CO ₂ , % снижения	S-SO ₂ , % снижения	Ni, % снижения	Co, % снижения	Cu, % снижения	Тормо- жение, %
Глеезём КОНТР	6,96	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	-21,9
Глеезём Гумат 0,5 дозы	6,88	107,81	114,25	87,47	78,19	98,38	-2,2
Глеезём Гумат 1 доза	6,81	102,02	92,67	102,34	97,42	91,61	-28,7
Глеезём Гумат 3 дозы	6,97	104,67	113,37	77,61	79,33	88,48	-12,7

В случае работы с образцами органогенного горизонта 0-5 см глеезёма криометаморфического (табл. 3) применялся только гуминовый препарат «Экобиосфера Органик Плюс» с различной кратностью доз внесения. Внесение данного мелиоранта не оказало значительно влияния ни на один из, рассматриваемых в исследовании, параметр, но и не оказало негативного эффекта на окружающую среду и живые организмы. Однако внесение 1 дозы гуминового препарата способствовало интенсивности роста семян по сравнению с контрольным образцом на 9%.

Таким образом, применение гуминового препарата «Экобиосфера Органик Плюс» для ремедиации глеезёма криометаморфического не показало своей эффективности.

Литература

1. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д. В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами. — Москва, 2012. — 304 с.
2. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. 2009. 182 с.
3. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). – Екатеринбург: Наука, - 1994. – 280с.
4. Геохимия техногенных ландшафтов / Н.А. Протасова. — Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2009. — 37 с. — 36 с.
5. ГОСТ 28268-89 Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений.
6. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функционирование почв в биосфере и экосистемах. – М.: Наука, - 1990. – 251с.
7. Игамбердиев В.М., Терешенко О.М., Кутыев Х.А. Оценка состояния экосистем суши в Норильском промышленном районе // Освоение Севера и проблема рекультивации: Доклады 2-й Международной конференции, - Сыктывкар, 1994. – С.188-197.
8. МР 2.1.7.2297—07 Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности.

9. Оценка и нормирование экологического состояния почв Норильского промышленного района: дис. кандидата биологических наук / Кудряшов С. В., Москва, 2010.
10. Соединения тяжелых металлов в почвах - проблемы и методы изучения. Ладонин Д.В. // Почвоведение. -2002. -N 6. -С. 682-692.
11. Яковлев А.С., Макаров О.А. Экологическая оценка, экологическое нормирование и рекультивация земель: основные термины и определения//Бюллетень «Использование и охрана природных ресурсов в России», 2006.

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ТЕСТ-РЕАКЦИЙ В МЕТОДЕ БИОТЕСТИРОВАНИЯ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНХИТРЕИД

Баранов А.П., Ладан С.С.

*ФГБНУ ВНИИ агрохимии им.Д.Н.Прянишникова, Москва, Россия
info@vniia-pr.ru*

В последние десятилетия биотестирование утверждено как метод определения токсичности грунтов и почв, являющийся эффективным приемом экологического исследования, позволяющим определить степень токсичности почвы для живых организмов без определения конкретных загрязняющих компонентов и их соединений. Выявлены почвенные организмы, в наибольшей степени пригодные в качестве тест-культур для биотестирования, такие как дождевые черви, энхитреиды, колемболы.

При оценке экологического риска биологические тесты регулярно востребованы. Однако при оценке загрязненных почв химический метод определения остаточных количеств поллютантов часто является единственным используемым методом, т.к. основные нормативные документы и правовые положения полагаются на данные химического анализа, содержание некоторых тяжелых металлов (ТМ) и органических веществ в почве.

Даже такого применения как в оценке токсичности водных сред, биотестирование почвы с использованием тест-организмов, в настоящее время, не получило.

Основными причинами такого положения дел, с нашей точки зрения, можно считать сложность интерпретации результатов биотестирования, трудоемкость выполнения некоторых биотестов с почвой, а также ограничения в применении тест-организмов по почвенным показателям (рН, плотность почвы).

Сложность интерпретации обусловлена тем, что действительная токсичность субстратов для тест-организмов не связана линейно с содержанием токсикантов в субстрате, а модифицируется экологическими факторами. К ним, в частности, относятся содержание органического вещества, рН среды, содержание кальция, доступность токсикантов для организмов [1, 2].

На примере биотестирования почвы с использованием энхитреид, как одних из наиболее чувствительных почвенных организмов [3], были изучены вопросы, связанные с линейностью между содержанием токсикантов в субстрате и токсичностью, выраженной через тест-реакции энхитреид. Проведен эксперимент по сравнению линейностей зависимостей. Так же, рассмотрены возможности упрощения процесса биотестирования путем подбора новых тест-реакций энхитреид.

С целью демонстрации максимального расхождения токсических эффектов и уровня загрязнений проведен следующий опыт. Проведено биотестирование почвы полевого опыта по многолетнему внесению осадка сточных вод (ОСВ). В данную почву за 15 лет была внесена доза 1440 тонн аэробно стабилизированного ОСВ. В лабораторных условиях эту почву экспериментально загрязнили нитратом кадмия в дозах 60 и 120 мг/кг. Почва была биотестирована по методике [4] на *Enchytraeus albidus* с определением тест-реакции на выживаемость. Биотест был модифицирован в части продолжительности биотестирования. Стандартная продолжительность была увеличена с 14 суток до 30. На рисунке 1 продемонстрированы результаты биотестирования [5].

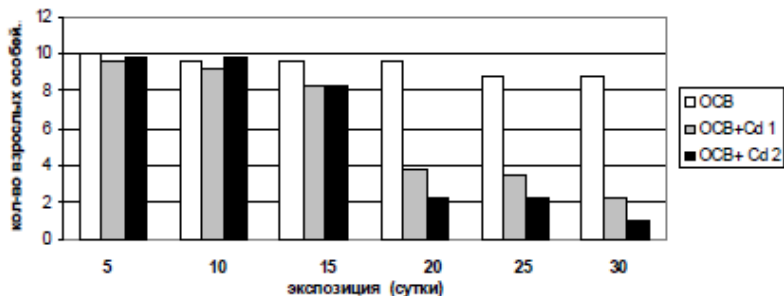


Рисунок 1. Динамика выживаемости *Enchytraeus albidus* на разных уровнях загрязнения почвы ОСВ: ОСВ – почва с аккумулярованной дозой осадка 1440 т/га, Cd 1- 60 мг/кг, Cd 2 – 120 мг/кг. Результаты выражают средние значения \pm стандартная ошибка, $n=5$, $P<0,05$ (здесь и на рис. 2)

Главным результатом эксперимента, очевидно, явилось не только ускорение роста токсичности после 14 суток, но и уско-

рение этого роста. Энхитреиды оказались устойчивы к высокому уровню загрязнения, во временных рамках стандартного биотеста (14 суток), благодаря питательности осадка. Известно, что содержание белка в ОСВ достигает 25%. Визуальные эффекты: изменение цвета организмов, замедление движения, наблюдаемые на временном отрезке до 14 суток показывают знаки токсического действия, которое не перешло в острый эффект в силу питательности среды.

Сложность интерпретации результатов биотестирования, по-видимому, наиболее велика в подобных ситуациях, когда высокий уровень загрязненности не подтверждается реальной токсичностью в отношении испытываемых организмов.

С целью получения более тесной корреляции уровень загрязнения/токсический эффект было проведено повторное биотестирование вариантов почвы первого опыта с новым тест-критерием – весом энхитреид. Олигохеты, извлеченные из почвы, промывались в водопроводной воде и взвешивались. На рисунке 2 показаны результаты биотестирования почвы.

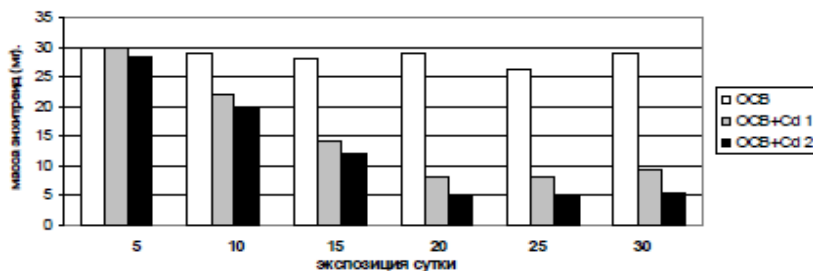


Рисунок 2. Динамика изменения массы на разных уровнях загрязнения почвы ОСВ

Динамика и величина эффектов данного биотестирования оказались близкими по отношению к результатам эксперимента на выживаемость. На пятнадцатые сутки наблюдались визуальные эффекты уменьшения размеров, замедление движения червей. Очевидно, что изменение веса при сохранении численности говорит о разной чувствительности данных реакций и может дать более узкое отношение между уровнем загрязненности и эффектом у энхитреид.

Коэффициенты корреляции составляли в первом биотестировании – 0,90, во втором – 0,95.

Однако трудоемкость процесса биотестирования с тест-реакцией по весу червей, ни в коей мере не решает вопрос популяризации применения биотестирования в системе оценок качества почвы. Измерение веса энхитреид в качестве тест-реакции значительно усложняет процесс биотестирования.

Очевидно, что поддержание гомеостаза организмом олигохет на фоновых образцах с высоким загрязнением будет снижать их функциональность, что в конечном итоге отразится на показателях почвы и тест-реакции, связанные с изменением почвенных показателей, могут дать высокие значения корреляций.

Известна работа по изучению активности энхитреид по оценке изменения некоторых почвенных показателей в зависимости от степени плотности исследуемой почвы [6]. Присутствие *E. albidus* в неуплотненной почве привело к повышению экстрагируемых водой концентраций натрия (17,4%), калия (16,8%), кальция (11,3%), магния (13,2%), растворенного органического углерода (14,5%) и нитратов (20,4%) в почвенных экстрактах.

Для оценки возможности усиления корреляции загрязнение/токсический эффект с одновременным упрощением процесса биотестирования нами было проведено исследование на энхитреидах с определением изменения их функциональности (продуктивности) как редуцентов, активно участвующих в минерализации органического вещества. Для снижения трудоемкости процесса биотестирования тест-критерий выживаемости был заменен на продуктивность червей, выраженную уровнем концентрации натрия и калия в водном экстракте почвы.

Стандартный тест на выживаемость энхитреид предполагает загрузку 10 организмов на 20 г почвы. Такая концентрация энхитреид в почве опытного сосуда на 1–1,5 порядка больше, чем в естественных почвенных условиях, и создает возможность значительной переработки почвы червями. В конце 2-х недельного опыта структура почвы, визуальна, очевидно изменена.

Для изучения возможности оценки токсичности субстрата по показателям активности, функциональности энхитреид проведен опыт по степени минерализации органического вещества почвы. Концентрацию натрия в водном экстракте почвы как показатель минерализации почвы определяли в почве, загрязненной кадмием в концентрациях 1.25, 2.5, 5.0, 1.0, 20.0, 40.0 мг/кг почвы.

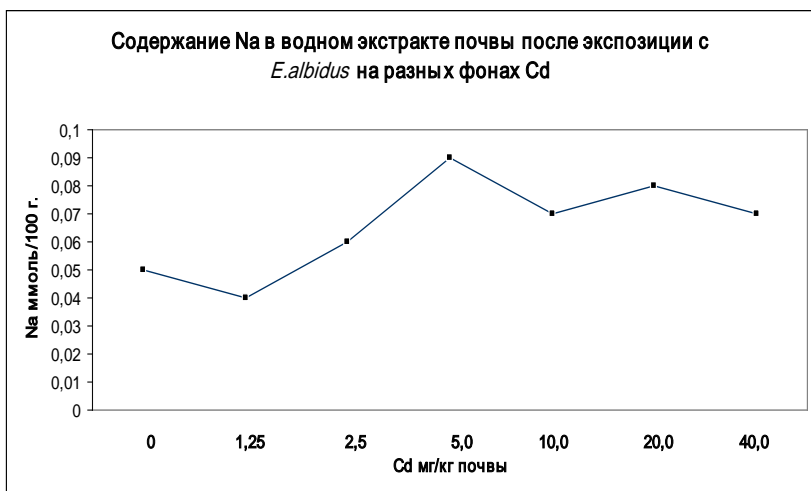


Рисунок 3. Концентрация Na^+ в почвенном растворе с разным содержанием Cd после 14-суточного биотестирования.

На рисунке 3 показано содержание натрия в растворе как возможный показатель изменения активности энхитрид на фоне загрязнения кадмием, не коррелировало с изменением концентрации металла.

Аналогичным образом, отсутствовала реакция изменения содержания органического вещества в другом исследовании [7]. В то же время реакция растворенного органического вещества отражала присутствие загрязнения в почве [8].

Дальнейшая работа по поиску тест-реакций, отличающихся плотной корреляцией с уровнем загрязнения и низкой трудозатратностью, должна ускорить процессы внедрения биотестов в оценку токсичности почв.

Литература

1. Филимонова Ж.В. Энхитриды (Oligochaeta, Enchytraeidae) в биотестировании и контроле загрязнения почв. Автореферат дис. канд.биол.наук. 2000.с 14.
2. Смирнова Т.С., Власова А.А. Биологическая диагностика качества почвы с использованием червей-энхитрид // Экология и промышленность России, 2017;21(10):18-21.

3. Горшкова И.А. Чувствительность почвенных энхитреид (Oligochaeta, Enchytraeidae) к поллютантам различной природы // Автореферат дис. канд. биол. наук. 2013. с.4.
4. Горшкова И.А., Гонгальский К.Б., Терехова В.А. Методика изменений токсичности почвы по реакциям энхитреид (Ф.Р.1.39.2014.18039) 2014. 24 с.
5. Баранов А.П., Лунев М.И. Использование биотеста с энхитреидами для оценки экотоксикологического состояния почвы // Плодородие 2019. №6.с.48-50.
6. Routhmeier O., Pieper S. Influence of Enchytraeidae (*Enchytraeus albidus*) and compaction on nutrient mobilization in an urban soil // Pedobiologia.2009. 53(1):29-40.
7. Pelosi C., Thiel P., Bart S. et al. The contributions of enchytraeids and earthworms to the soil mineralization process in soils with fungicide. The contributions of enchytraeids and earthworms to the soil mineralization process in soils with fungicide // Ecotoxicology 30, 1910–1921 (2021).
8. van Vliet P.C.J., Beare M.H., Coleman D.C., Hend P.F. Effects of enchytraeids (Annelida: Oligochaeta) on soil carbon and nitrogen dynamics in laboratory incubations // *Applied Soil Ecology*, 2004, 25(2), 147-160.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗАЦИИ СРЕДЫ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ *DAPHNIA MAGNA* К АНТИБИОТИКУ ЦИПРОФЛОКСАЦИНУ

Батаков А.Д.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
batutan70@gmail.com*

Эффекты антибиотиков, как известно, зависят не только от особенностей их химического строения, но и от внешних факторов, условий среды, в которых они распространяются [1]. В наилучшей степени зависимость действия антибиотиков от внешних условий изучена на примере бактериальных сообществ в связи с необходимостью решения острой проблемы роста антибиотикорезистентных микроорганизмов. Вместе с тем, влиянию фармпрепаратов, ненамеренно поступающих в природные среды, подвергаются животные и растения.

На текущий момент опубликовано относительно небольшое число исследований, посвящённых влиянию антибиотиков на водных беспозвоночных животных. Однако интерес к таким исследованиям обусловлен возрастанием загрязнения антибиотиками водных объектов до такой степени, что их токсическое действие может избирательно проявляться на важнейших звеньях трофической цепи, что приводит к нарушению стабильного функционирования биоценозов. Так, показано, что кларитромицин и левофлоксацин не оказывают токсического воздействия на дафний, одновременно эти антибиотики высокотоксичны для зелёных одноклеточных водорослей [3].

Широко используемый в медицине, животноводстве и других отраслях народного хозяйства антибиотик ципрофлоксацин (химическая формула - $C_{17}H_{18}FN_3O_3$) – наиболее популярный представитель фторхинолонов II поколения [6]. Это лекарственное средство с выраженными антибактериальными свойствами действует на грамотрицательные микроорганизмы. Однако накапливающиеся дозы этого токсиканта в водных средах неизбежно оказывают влияние и на водных беспозвоночных. Недостаточно изучено действие одних и тех же доз ципро-

флуксацина в разных условиях среды, в частности, при разной минерализации [8].

Распространенность ципрофлоксацина в лечебной практике и, соответственно, в природных средах, куда он неизбежно попадает, вызвала большой интерес к проявлению его активности на водные и почвообитающие организмы [7].

Цель данной работы – оценить влияние минерализации на активность антибиотика ципрофлоксацина по отношению к тест-культуре пресноводных низших ракообразных – *Daphnia magna*.

Эксперименты проводили с использованием 4-х вариантов водно-солевых смесей с минерализацией 1, 2,5, 4,0 и 6,0 г/л, составы которых сходны с водными экстрактами отходов некоторых химических производств. Антибиотик ципрофлоксацин в дозе 60 мг/л добавляли в виде водного раствора.

Биотестирование на ракообразных *Daphnia magna* проведено по стандартной «Методике определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний», согласно ФР.1.39.2007.03222 с модификацией по объему тестируемых проб [5]. Учет выживших особей ракообразных проводили в динамике: при экспозиции через 24, 48, 72, 96 и 120 ч.

Результаты показали, что выживаемость рачков под воздействием ципрофлоксацина снижается. Причем критические значения смертности дафний при 6 г/л проявляются уже в первые сутки экспозиции.

По мере увеличения срока экспозиции во всех вариантах, включая контрольные (биологизированная вода без добавления антибиотика и с 60 мг/л), выживаемость ожидаемо снижается.

Динамика выживаемости дафний при разном уровне минерализации отражена на рисунке 1.

Из представленных данных видно, что по мере увеличения показателя минерализации ингибирующее влияние ципрофлоксацина на выживаемость дафний возрастает, в то время как в контроле (культивационной воде) выживаемость и спустя 120 ч составляла около 83%.

При минерализации 0 г/л выживаемость составляла значительные 83% даже спустя 48 ч экспозиции, затем же начала снижаться вплоть до 25% спустя 120 ч, что можно объяснить отличием среды от культивационной воды, отсутствия в ней питательных веществ для тест-организмов.

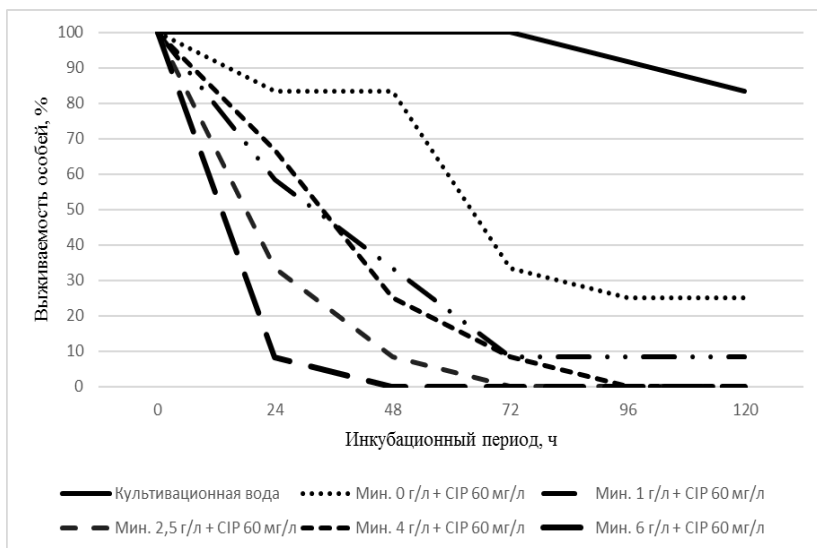


Рисунок 1. Динамика выживаемости дафний под действием ципрофлоксацина (60 мг/л) при разной минерализации среды

При минерализации 1 г/л падение тест-функции почти в 2 раза (до 58%) наблюдалось уже спустя 24 ч экспозиции, затем она продолжила снижаться и в период после 72 ч экспозиции составляла около 8%.

При показателях в 2,5 г/л и 4 г/л выживаемость упала в 3 и в 1,5 раза соответственно уже спустя 24 ч. Не совсем понятными остаются причины лучшей выживаемости дафний при минерализации в 4 г/л в это время. Уже спустя 72 и 96 ч соответственно показатели её снизились до нуля.

При самом высоком показателе минерализации в 6 г/л наблюдался значительный токсический эффект (падение тест-функции до 8% уже через 24 ч), а спустя 48 ч все дафнии в данных пробах погибли.

Подобные закономерности, по-видимому, можно объяснить тем, что дафнии являются естественными обитателями пресноводных водоёмов.

В литературе встречаются описания случаев повышения толерантности живых организмов к токсикантам на фоне солёности среды. Очевидно, что этот факт не является общей закономерностью, во всяком случае для типичных пресноводных рако-

образных даже невысокая минерализация (1 г/л) приводит к повышению чувствительности к антибиотику.

Таким образом, увеличение минерализации среды в диапазоне 1-6 г/л пропорционально повышает чувствительность тест-культуры рачков к антибиотику ципрофлоксацину.

Литература

1. Gothwal R., Shashidhar T. Antibiotic Pollution in the Environment: A Review. *Clean – Soil, Air, Water*. 2014, 42 (9999):1–11. doi: 10.1002/clen.201300989
2. Wang S., Wang H. Adsorption behavior of antibiotic in soil environment: a critical review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2015. V.9. P. 565–574.
3. Yamashita, N.; Yasojima, M.; Nakada, N.; Miyajima, K.; Komori, K.; Suzuki, Y.; Tanaka, H. Effects of antibacterial agents, levofloxacin and clarithromycin, on aquatic organisms. *Water Sci. Technol.* 2006. N. 53. P. 65-75.
4. Кофман В.Я. Антибиотики в сточных водах: источники, определение токсичности, методы удаления // «Вода Magazine», №4 (92), 2015 г.
5. ФР .1.39.2007.03222. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний.
6. Козлов Р.С., Голуб А.В. Ципрофлоксацин в современной клинической практике // *КМАХ*. 2010. №2.
7. Тимофеева С.С., Гудилова О.С. Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы // XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – Т. 6. – №. 3 (23). – С. 251-265.
8. Терехова В.А., Руднева И.И., Поромов А.А., Парамонова А.И., Кыдралиева К.А. Распространение и биологические эффекты антибиотиков в водных экосистемах (обзор) // *Вода: химия и экология*. 2019. № 3-6 (119). С. 92-112.

КАРБОНИЗАЦИЯ ОТХОДОВ РАСТЕНИЕВОДСТВА: СВОЙСТВА БИОЧАРА И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

***Бауэр Т.В., Хронюк О.Е., Барахов А.В., Минкина Т.М.,
Болдырева В.Э.***

*Южный федеральный университет, Академия биологии
и биотехнологии им. Д.И.Ивановского, Ростов-на-Дону, Россия
bauertatyana@mail.ru*

Непрерывный рост мирового населения вызывает растущий спрос на продукты питания, стремительную урбанизацию и эффективное управление отходами [1]. Большая часть отходов, производимых ежедневно, приходится на сельскохозяйственные, накопление которых представляет собой огромную экологическую проблему [2]. Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий утилизации отходов, направленных на предотвращение негативного воздействия антропогенной деятельности на окружающую среду, являются в настоящее время приоритетными и актуальными. К числу таких технологий относится карбонизация возобновляемой биомассы путем пиролиза. В результате сухого пиролиза – высокотемпературного (300-900°C) обугливания исходной биомассы, которая практически не используется в хозяйственной деятельности, а ее хранение может нарушить экологическое состояние среды, в бескислородной среде получают ценный продукт – биочар [3].

Биочар относится к конкурентоспособному стабилизатору/иммобилизатору поллютантов в почвах [4]. Он характеризуется большой площадью удельной поверхности, высокими значениями рН, пористой структурой, разнообразными функциональными группами и высокой химической и биологической стабильностью, которые способствуют прочной иммобилизации тяжелых металлов в загрязненной почве [5]. Различные факторы, такие как исходное сырье и условия проведения пиролиза (температура, время выдержки, скорость нагрева, регулирование подачи инертного газа, размер частиц биомассы и др.) могут

оказывать влияние на количество и качество биочара, состав и его гетерогенную структуру [6].

Цель исследования заключалась в сравнительной оценке влияния биочаров, полученных из различных отходов растениеводства, на адсорбционную способность чернозема обыкновенного по отношению к тяжелым металлам.

Для получения образцов биочара в эксперименте были использованы эталонные условия пиролиза, согласно работе [7]: максимальная температура нагрева 500°C , скорость нагрева $10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ и время выдержки биомассы 60 мин. В качестве исходного сырья использованы 2 вида отходов растениеводства юга России: солома пшеницы и шелуха риса. Перед проведением пиролиза растительный материал предварительно несколько раз промывали водой, после чего сушили при комнатной температуре, затем при температуре 105°C в сушильном шкафу до полного удаления влаги. Высушенное и частично измельченное (в случае соломы) сырье загружали в специально изготовленную лабораторную пиролизную установку (объем 2,2 л) из нержавеющей жаропрочной стали, и помещали в муфельную печь, подавая в реторту азот (чистота $> 99,99\%$) со скоростью потока 50 мл/мин для создания инертной атмосферы. После завершения процесса пиролиза реторту охлаждали до комнатной температуры, извлекали полученные образцы биочара и анализировали их физико-химические, структурные и текстурные характеристики.

Определение площади удельной поверхности (SBET) и пористости выполнено на волюметрическом анализаторе «ASAP 2020» (Micromeritics, США) по методу низкотемпературной адсорбции азота. Расчет параметров проведен с использованием метода Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) в интервале относительного давления $P/P_0=0,05-0,33$. Распределение пор по размеру рассчитано с помощью метода теории функционала плотности [8]. Элементный состав образцов биочара (C, H, N) определен на анализаторе Perkin Elmer (модель CHN, 2400 Series II) методом сжигания в потоке кислорода. Содержание общей золы измерялось путем сжигания образцов в муфельной печи при температуре 650°C в течение 3 ч [9], а содержание кислорода рассчитывалось по разнице между 100% и суммой определяемых элементов (C, H, N) и содержанием золы. Результаты исследования использованы для расчета атомных соотношений H/C и O/C, характеризующих степень ароматичности и карбони-

зации биочара [10]. СЭМ изображения образцов получены на базе ООО «Системы для микроскопии и анализа» (Сколково) с использованием микроскопа Helios Nanolab 660.

Элементный состав и физико-химические свойства полученных биочаров представлены в таблице 1 и 2. Относительные показатели эффективности сорбционных свойств (площадь удельной поверхности и объем пор) биочаров убывают в зависимости от типа исходного сырья в ряду: биочар из соломы пшеницы > биочар из шелухи риса. По размеру (нм) пор наблюдается обратный ряд (табл. 1).

Таблица 1. Физико-химические свойства биочаров, полученных из различных отходов растениеводства

Сорбент	S _{ВЕТ} , м ² /г	Объем пор V, см ³ /г (%)				Средний диаметр пор, нм	рН
		V _{общ}	V _{макро} > 50 нм	V _{мезо} 2-50 нм	V _{микро} < 2 нм		
Биочар из соломы пшеницы	129,63	0,208 (100)	0,021 (10)	0,058 (28)	0,129 (62)	2,14	10,15
Биочар из шелухи риса	48,27	0,117 (100)	0,012 (10)	0,055 (47)	0,050 (43)	4,61	9,76

Элементный состав образцов биочара также тесно связан с типом исходного сырья. Биочар из соломы пшеницы характеризуется большим содержанием С и меньшим содержанием Н, N, О и золы по сравнению с биочаром из шелухи риса (табл. 2). Для него характерны также меньшие соотношения Н/С (0,30) и О/С (0,04). В результате СЭМ исследований установлено, что полученные образцы биочара (рис. 1) характеризуется шероховатой поверхностью и пористой структурой.

Таблица 2. Элементный состав биочаров, полученных из различных отходов растениеводства

Сорбент	С	Н	N	О	зола	Н/С	О/С
	%						
Биочар из соломы пшеницы	79,36	1,97	0,41	4,58	13,68	0,30	0,04
Биочар из шелухи риса	67,12	3,18	0,59	5,92	23,19	0,56	0,07

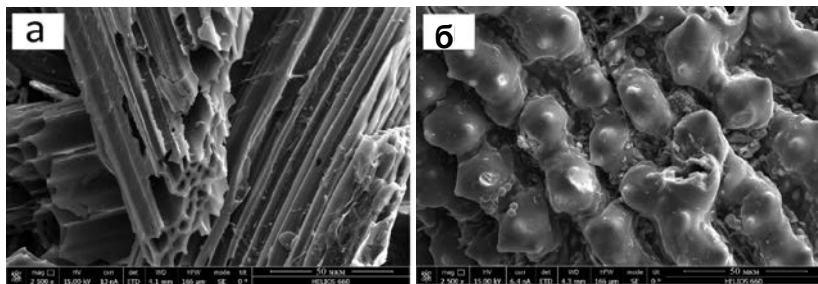


Рисунок 1. СЭМ изображения биочара из соломы пшеницы (а) и шелухи риса (б)

Для изучения влияния биочаров на поглощательную способность почвы (чернозем обыкновенный карбонатный (II)) по отношению к ТМ проведены специальные сорбционные эксперименты без и с добавлением исследуемых сорбентов (БСП – почва+биочар из соломы пшеницы; БСР – почва+биочар из шелухи риса) в дозе 2масс% с использованием растворов нитратной соли свинца в концентрациях 0,5; 1; 2; 4; 6; 8 и 10 $\text{мМ}\cdot\text{л}^{-1}$. Массовое соотношение твердой и жидкой фаз составляло 1:10. Суспензии взбалтывали в течение часа и оставляли на сутки при температуре 298 ± 1 К. Выбранного времени достаточно для достижения полного равновесия в системе [11]. Затем суспензию фильтровали через фильтр «синяя лента». Концентрации ионов металла в водном растворе определяли с использованием атомно-абсорбционного спектрометра «Квант-2».

По полученным данным строили графическую зависимость в координатах $C_p - C_{ад}$; где C_p - равновесная концентрация внесенного поллютанта в растворе, $\text{мМ}\cdot\text{л}^{-1}$; $C_{ад}$ - удельное содержание поллютанта в фазе сорбента, $\text{мМ}\cdot\text{кг}^{-1}$. Для аппроксимации изотерм использованы двухпараметрические сорбционные модели Ленгмюра (1) и Фрейндлиха (2):

$$C_{ад} = \frac{C_{\infty} K_L C_p}{(1 + K_L C_p)} \quad (1)$$

$$C_{ад} = K_f C_p^{1/n} \quad (2)$$

где C_{∞} – величина максимальной адсорбции металла, $\text{мМ}\cdot\text{кг}^{-1}$; K_L – константа Ленгмюра, $\text{л}\cdot\text{мМ}^{-1}$; K_F – константа Фрейндлиха, $\text{кг}\cdot\text{л}^{-1}$; $1/n$ – эмпирический показатель степени в уравнении Фрейндлиха

Свободную энергию Гиббса (ΔG) рассчитывали по формуле (3):

$$\Delta G = -RT \ln K_L \quad (3)$$

Построение экспериментальных изотерм и их аппроксимация были выполнены в статистической программе «SigmaPlot 12.5» (Systat Software, США) и графическом пакете программы «Origin 2018» (OriginLab, США).

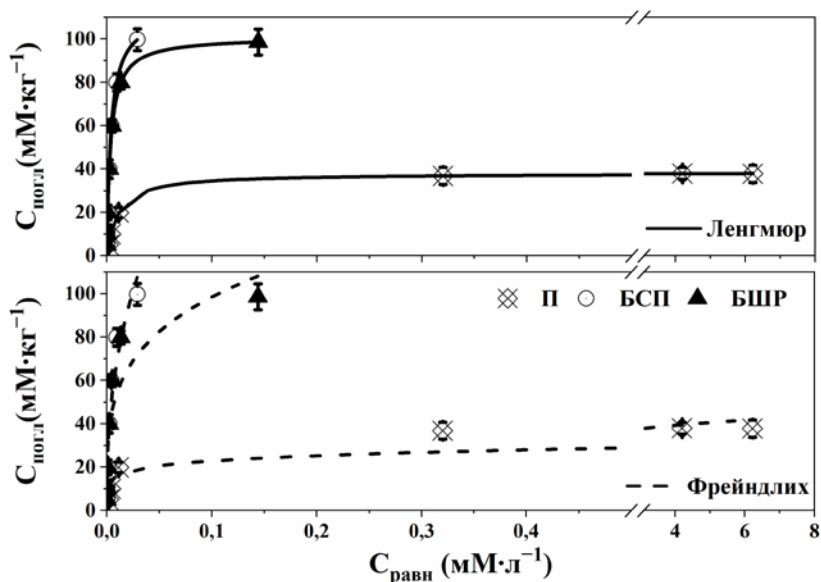


Рисунок 2. Изотермы адсорбции Pb^{2+} исследуемыми сорбентами: БСП – почва+биочар из соломы пшеницы; БШР – почва+биочар из шелухи риса; П – почва

Изотермы адсорбции ионов Pb^{2+} биочарами (рис. 2) в целом относятся к L-форме по классификации Джайлса [12]. Приближенность к оси ординат при начальных концентрациях указывает на доступность наиболее вакантных сорбционных центров.

По мере увеличения концентраций и уменьшения активных мест адсорбции виден выход кривой на плато. Данные особенности указывают на неоднородность поверхности сорбента. Сорбционные центры отличаются сродством к адсорбируемому катиону и величинами максимальных адсорбций.

В ходе выполнения аппроксимации (табл. 3, 4) полученных изотерм уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха было выявлено, что коэффициенты корреляции (R^2) имеют достаточно высокие значения. Установлено (табл. 3), что по величине максимальной сорбции (C_∞), полученной из уравнения Ленгмюра, представленные сорбенты располагаются в ряду: БСП > БШР > П. Параметр Кл ($\text{кг}\cdot\text{л}^{-1}$), характеризующий прочность связи между ионом металла и функциональными центрами на сорбирующей поверхности, изменяется идентично. Данное ранжирование по параметрам адсорбционной способности соответствует установленным значениям площади удельной поверхности и пористости биочаров (табл. 1). Отрицательные значения ΔG (табл. 3), рассчитанные по уравнению Ленгмюра, показали, что реакция поглощения Рb сорбентами самопроизвольна в прямом направлении, что соответствует устойчивому закреплению ионов Рb на поверхности сорбентов.

Параметр из уравнения Фрейндлиха Кф ($\text{кг}\cdot\text{л}^{-1}$), который характеризует относительную эффективность сорбции, убывает в ряду: БСП > БШР > П.

Стоит отметить, что значения Кф всегда выше, чем $C_{\text{макс}}$, рассчитанные из уравнения Ленгмюра, а величина безразмерного параметра $1/n$ позволяет выявить энергетическую неоднородность реакционных центров на сорбирующей поверхности и может изменяться в интервале $0 < 1/n < 1$ или $= 1$ [13]. При величине $1/n$, приближающейся к 0, возрастает неоднородность сорбционных центров, к 1 – уменьшается. Параметр изменяется в пределах 0,18-0,63.

Таблица 3. Параметры уравнения Ленгмюра для адсорбции Рb исследуемыми почвой без и с внесением углеродистых сорбентов

Сорбент	$K_L, \text{л}\cdot\text{мМ}^{-1}$	$C_\infty, \text{мМ}\cdot\text{кг}^{-1}$	$-\Delta G, \text{кДж}\cdot\text{М}^{-1}$	R^2
БСП	232,33±10,51	162,78±8,65	13,16	0,992
БШР	219,69±10,95	155,44±7,23	13,47	0,983
П	46,15±5,42	61,98±8,64	9,49	0,983

Таблица 4. Параметры уравнения Фрейндлиха для адсорбции Pb почвой без и с внесением углеродистых сорбентов

Сорбент	Кф, л·кг ⁻¹	1/n	R ²
БСП	2164,72±103,98	0,63±0,08	0,938
БШР	1955,87±150,32	0,60±0,15	0,901
П	56,77±18,30	0,18±0,09	0,844

Различия в поглотительной способности адсорбентов возникает ввиду их отличий между собой в свойствах (табл. 1). Основными характеристиками для адсорбента является объем пор, пористость и площадь удельной поверхности. Увеличение данных параметров приводит к увеличению количества активных сорбционных центров для катионов металла [14]. Представленные сорбенты по указанным характеристикам располагаются в ряду: БСП > БШР > П.

Таким образом, изучено влияние двух типов биочаров, полученных из: соломы пшеницы и шелухи риса, на адсорбционную способность чернозема обыкновенного карбонатного по отношению к Pb. Установлено, что добавление к почве сорбентов привело к заметному увеличению сорбционной емкости и прочности удерживания металла в следующей последовательности: биочар из соломы пшеницы > биочар из шелухи риса > почва. Биочар из соломы пшеницы оказался наиболее эффективным сорбентом, что связано с его более высокими показателями площади удельной поверхности и микропористой структурой.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22–76–10054) в Южном федеральном университете.

Литература

1. Ahmad A., Zahra M., Alam F., Ali S., Pervaiz M., Saeed Z., Younas U., Mushtaq M., Rajendran S., Luque R. A sustainable approach for the multi-dimensional exploitation of mixed biochar based nanocomposites // Fuel. 2023. Vol. 336. P. 126930.
2. Maji S., Dwivedi D.H., Singh N., Kishor S., Gond M. Agricultural Waste: Its Impact on Environment and Management Approaches.

Emerging Eco-friendly Green Technologies for Wastewater Treatment. Springer, Singapore. 2020. pp. 329-351.

3. Fahmy T.Y.A., Fahmy Y., Mobarak F., El-Sakhawy M., Abou-Zeid R.E. Biomass pyrolysis: past, present, and future // Environment development and sustainability. 2020. Vol. 22. Is. 1. P. 17-32.
4. Tan L., Ma Z., Yang K., Cui Q., Wang K., Wang T., Wu G.L., Zheng J. Effect of three artificial aging techniques on physicochemical properties and Pb adsorption capacities of different biochars // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 699. P. 134223.
5. Yuan C., Gao B., Peng Y., Gao X., Fan B., Chen Q. A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: Importance of soil and biochar properties // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 756. P. 144058.
6. Suguhiro T.M., de Oliveira P.R., de Rezende E.I.P., Mangrich A.S., Marcolino Junior L.H., Bergamini M.F. An electroanalytical approach for evaluation of biochar adsorption characteristics and its application for lead and cadmium determination // Bioresource Technology. 2013. Vol. 143. P. 40-45.
7. Abbas Q., Liu G., Yousaf B., Ali M. U., Ullah H., Munir M. A. M., Liu R. (2018). Contrasting effects of operating conditions and biomass particle size on bulk characteristics and surface chemistry of rice husk derived-biochars // Journal of analytical and applied pyrolysis. 2018. Vol. 134. P. 281-292.
8. Landers J., Gor G.Y., Neimark A.V. Density functional theory methods for characterization of porous materials // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2013. Vol. 437. P. 3-32.
9. ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97) Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности (с Изменением № 1), - Взамен ГОСТ 11022-90; введ. 1997-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2006. 8 с.
10. Suliman W., Harsh J.B., Abu-Lail N.I., Fortuna A.M., Dallmeyer I., Garcia-Perez M. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties // Biomass Bioenergy. 2016. Vol. 84. P. 37-48.
11. Пинский Д. Л., Минкина Т. М., Манджиева С. С., Федоров Ю. А., Бауэр Т. В., Невидомская, Д. Г. Особенности поглощения Cu (II), Pb (II) и Zn (II) черноземом обыкновенным из растворов нитратов, хлоридов, ацетатов и сульфатов // Почвоведение. 2014. №. 1. С. 22-22.
12. Джэйлс Ч., Итром Б. Ключи Дж. и др. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел. 1987.

13. Анисимов В. С., Круглов С. В., Алексахин Р. М. Влияние органического вещества на параметры селективной сорбции кобальта и цинка почвами и выделенными из них илистыми фракциями // Почвоведение. 2011. №. 6. С. 675-684.
14. Huang, Y., Zeng, X., Guo, L., Lan, J., Zhang, L., Cao, D. Heavy metal ion removal of wastewater by zeolite-imidazolate frameworks // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 194. P. 462-469.

МЕХАНИЗМ СОРБЦИИ ЛЕВОФЛОКСАЦИНА МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКИМ КООРДИНАЦИОННЫМ ПОЛИМЕРОМ MIL-88B

*Бондаренко Л.С.¹, Дзеранов А.А.^{1,2,3}, Баймуратова Р.К.^{1,3},
Джардималиева Г.И.^{1,3}, Кыдралиева К.А.¹*

¹*Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет), Москва, Россия*

²*НИИ скорой помощи имени Н.В. Склифосовского, Москва, Россия*

³*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская область, Россия
l.s.bondarenko92@gmail.com*

Широкое распространение антибиотиков приводит к их повсеместному присутствию в водоемах и к экологическим рискам [1]. Левофлоксацин (LEV) является одним из наиболее широко используемых фторхинолоновых антибактериальных средств, который действует путем ингибирования топоизомераз [2]. Левофлоксацин широко применяется для лечения некоторых инфекционных заболеваний (например, инфекций брюшной полости и пневмонии) [3], а также инфекции, вызванной новым коронавирусом COVID-19 [4]. Благодаря широкому спектру преимуществ, включая низкую стоимость, чрезмерное и неправильное использование антибиотиков людьми (в Китае в 2013 году - около 162 тонны, в том числе около 25,5 тонн хинолонов) [5], животными [6], в сельском хозяйстве и аквакультуре, неизбежно приводит к попаданию в окружающую среду [7]. В последние годы левофлоксацин был обнаружен в поверхностных водах, грунтовых водах, сточных водах очистных сооружений и даже в питьевой воде во многих странах [8]. Присутствие левофлоксацина в воде может вызвать неблагоприятное воздействие на водные виды растений и повысить устойчивость бактерий [9]. При попадании в организм человека с пищевыми продуктами или водой антибиотики могут становиться причиной появления антибиотикорезистентных бактерий и генов [10, 11]. Левофлоксацин ($C_{18}H_{20}FN_3O_4$, 361,368 г/моль) принадлежит к классу фторхинолоновых антибиотиков и является оптическим S(-) изомером офлоксацина [12]. Химическая структура препарата

левофлоксацина зависима от рН и представлена на рис. 1, где показано его катионное, анионное, нейтральное и цвиттер-ионное поведение при различных значениях рН [13]. LEV в основном присутствует в катионной форме при рН < 5 и в анионной форме при рН > 8,5, то время как цвиттер-ионная и нейтральная формы присутствуют при рН между значениями pK_{a1} (6.02) и pK_{a2} (8.15).

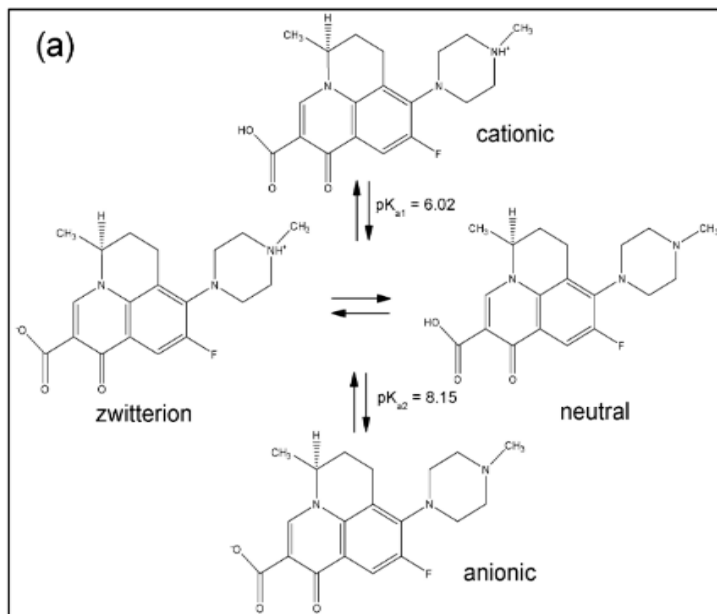


Рисунок 1. Химическая структура левофлоксацина в зависимости от рН [13]

Для сорбции амфифильных молекул левофлоксацина используют различные таргентные сорбенты (наночастицы металлов с N-допированной углеродной поверхностью, (активированный уголь) [14, 15, 16]. Однако они работают в узком диапазоне рН [5-7] или обладают низкой сорбционной емкостью.

В данной работе был исследован механизм сорбции левофлоксацина металл-органическими координационными полимерами (МОКП), в частности, МП-88b. МП-88b представляет собой мезопористый МОКП, состоящий из тримеров железа, соединенных лигандами терефталевой кислоты [17].

В качестве целевого загрязнителя для сорбции был использован аптечный препарат «Левифлоксацин-Вертекс» с содержанием левофлоксацина 78,84%. Для проведения сорбционных экспериментов была приготовлена суспензия МОКП 1 г/л с добавлением левофлоксацина в диапазоне концентрации 10-500 мг/л. Полученную суспензию оставляли на качалке при 110 об/мин на 30 мин/24 ч при комнатной температуре, далее фильтровали через химическую воронку с фильтровальной бумагой «белая лента» и определяли оптическую плотность растворов в кварцевой кювете толщиной 10 мм при $\lambda = 287$ нм. В качестве контроля использовали деионизированную воду. Степень извлечения левофлоксацина рассчитывали по разнице исходной и равновесной концентраций.

Сорбционная емкость для образцов МОКП по отношению к левофлоксацину при различных pH составила 51, 59 и 50 мг·г⁻¹ для pH 5,0; 7,0 и 9,0 соответственно. Структура адсорбционного слоя поверхностно-активных веществ на твердых сорбентах косвенно выражается в форме изотермы сорбции [18].

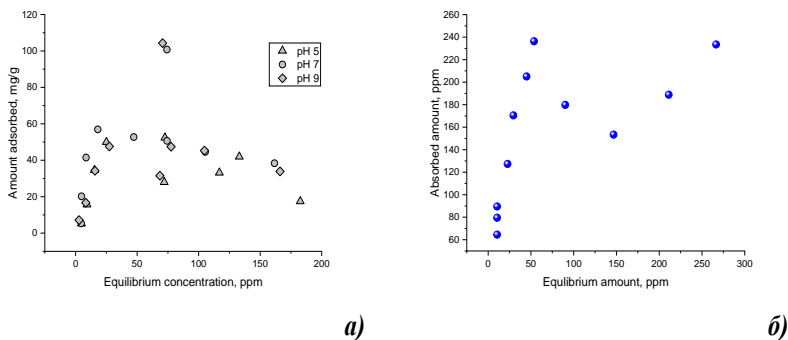


Рисунок 2. Изотермы сорбции МОКП по отношению к левофлоксацину: 24 часа (а), 30 минут pH 7 (б)

На первом участке изотерм сорбции (до 75 мг/л и 290 мг/л левофлоксацина) наблюдается рост кривой, указывающей на сорбцию препарата МОКП (рис. 2, а и б). Согласно кривым кинетики сорбции сорбция на участке до 100 мг/л (для 30 мин, рис. 2б) может быть описана уравнение кинетики псевдo-второго порядка, а в интервале до 290 мг/л – псевдо-первого по-

рядка, что свидетельствует о превалировании химической сорбции над физической при концентрациях левофлоксацина ниже 100 мг/л. Анализ данных ИК-спектроскопии показал, что при добавлении левофлоксацина в концентрации ниже 100 мг/л образование комплекса «фармпрепарат-МОКП» происходит за счет связывания карбоксильных групп левофлоксацина и гидроксильных групп МОКП. При увеличении концентрации левофлоксацина до 290 мг/л связывание образуется за счет водородных связей.

На изотермах сорбции наблюдается локальный максимум, участок десорбции, о которой свидетельствует высвобождение ионов железа в раствор, локальный минимум, затем рост сорбционного параметра (рис. 2а и б). Отклонение формы изотермы от линейной на данном участке характеризует конкурентный процесс мицеллообразования и сорбционного поглощения на поверхности сорбента, характеризуемый величинами энергий адсорбции и ассоциации. В зависимости от получаемых значений указанных параметров на кривой наблюдается выход на плато или локальный минимум, обусловленный превалированием мицеллообразующих сил над энергией сорбционного поглощения [19].

Мицеллообразование левофлоксацина подтверждается наличием перегиба на кривой зависимости УФ-поглощения от концентрации фармпрепарата, полученной на максимуме поглощения при длине волны $\lambda = 287$ нм. Таким образом, для препарата после 30 мин качания концентрация 285 мг/л соответствует критической концентрации мицеллообразования (ККМ). Увеличение времени качания приводит к снижению ККМ до 75 мг/л. При этом наибольшее значение ККМ соответствует рН 7, при котором левофлоксацин существует в цвиттер-ионной форме.

Согласно данным ИК-спектроскопии, левофлоксацин, оставленный на три часа на качалке при тех же условиях, что и в случае сорбции, демонстрирует появление выраженных полос 2918 см^{-1} и 2850 см^{-1} , которые свидетельствуют об образовании связей с участием СН-групп ароматического кольца и СН_2 -групп. Кроме того, увеличение интенсивности полос 1539 см^{-1} и 1472 см^{-1} указывают на участие гидрофобных С-С и $\text{С}=\text{С}$ групп ароматического скелета в мицеллообразовании. Увеличение интенсивности полосы 1576 см^{-1} , отнесенной к карбоксилатной груп-

пе, может указывать на параллельное образование хелатов с ионами Ca^{2+} , присутствующих в суспензии в качестве примесных ионов. Данные динамического светорассеивания указывают на образование дисперсных частиц со средним гидродинамическим диаметром 130 нм при концентрации левофлоксацина 75 мг/л через 24 часа на качалке. Далее увеличение концентрации левофлоксацина приводит к увеличению среднего гидродинамического диаметра до 416 нм при добавлении 200 мл/л препарата. Рост дисперсных частиц может быть объяснен их агрегацией при увеличении концентрации.

Сравнение мицеллообразования левофлоксацина при отсутствии примесей [20] и в их присутствии показало, что примесные соединения приводят к значительному снижению значения ККМ с 21 682 мг/л для чистого препарата до 285 мг/л для аптечного препарата. Наличие в растворе электролитов и неэлектролитов является одним из факторов, влияющих на величину ККМ [21]. При увеличении концентрации соли эффективный заряд поверхности мицелл снижается, и работа введения мономерного соединения в мицеллу и взаимодействия мицелл становится меньше, благодаря чему снижается величина ККМ.

Таким образом, присутствие примесных ионов является ключевым фактором, влияющим на поведение левофлоксацина в растворе, приводя к образованию мицелл и десорбции препарата.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-23-00621.

Литература

1. Liu W., Zhang J., Zhang C., Ren L. Sorption of norfloxacin by lotus stalk-based activated carbon and iron-doped activated alumina: Mechanisms, isotherms and kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 2011 – V. 171. No. 2. – P.431–438. DOI:10.1016/j.cej.2011.03.099
2. Basarab G.S., Eakin A.E. and Wright W. N. Design of Antibacterial Agents in Molecular Medical Microbiology (Second Edition), 2015 – P.611–626. DOI:10.1016/B978-0-12-397169-2.00034-2
3. Khan A., Khan A., Asiri A.M., Khan S. A. Studies on the oxidation of levofloxacin by N-bromosuccinimide in acidic medium and their mechanistic pathway. *Journal of Molecular Liquids*, 2016 – V. 218. – P. 604–610. DOI:10.1016/j.molliq.2016.02.051

4. Karampela I., Dalamaga M. Could Respiratory Fluoroquinolones, Levofloxacin and Moxifloxacin, Prove to be Beneficial as an Adjunct Treatment in COVID-19? *Archives of Medical Research*. 2020 – V. 51. No. 7. – P. 741–742. DOI:10.1016/j.arcmed.2020.06.004
5. Zhang Q., Ying G., Pan C., Liu Y., Zhao J. Comprehensive Evaluation of Antibiotics Emission and Fate in the River Basins of China: Source Analysis, Multimedia Modeling, and Linkage to Bacterial Resistance. *Environmental Science and Technology*, 2015 – V. 49. No. 11. – P. 6772–6782. DOI:10.1021/acs.est.5b00729
6. Sitovs A., Sartini I., Giorgic M. Levofloxacin in veterinary medicine: a literature review. *Research in Veterinary Science*, 2021. – V. 137. – P. 111–126. DOI:10.1016/j.rvsc.2021.04.031
7. Qiao M., Ying G.G., Singer A.C., Zhu Y.G. Review of antibiotic resistance in China and its environment. *Environment International*, 2018 – V. 110. – P. 160–172. DOI: 10.1016/j.envint.2017.10.016
8. Liu Y., Guo H.G., Zhang Y.L., Tang W.H., Cheng X., Li W. Heterogeneous activation of peroxymonosulfate by sillenite Bi₂FeO₄: Singlet oxygen generation and degradation for aquatic levofloxacin. *Chemical Engineering Journal*, 2018 – V. 343. – P. 128–137. DOI: 10.1016/j.cej.2018.02.125
9. Hamdi N., Touffet A., Deborde M., Journel R., Leitner N.K.V. Levofloxacin oxidation by ozone and hydroxyl radicals: Kinetic study, transformation products and toxicity. *Chemosphere*, 2013 – V. 93. – P. 604–611 DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.05.086
10. Zhang M., Zuo J., Yu X., Shi X., Chen L., Li Z. Quantification of multi-antibiotic resistant opportunistic pathogenic bacteria in bioaerosols in and around a pharmaceutical wastewater treatment plant. *Journal of Environmental Sciences*, 2018. –V. 72. – P. 53-63. DOI: 10.1016/j.jes.2017.12.011;
11. Inyinbor A.A., Bello O.S., Fadiji A.E., Inyinbor H.E. Threats from antibiotics: A serious environmental concern. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018. – V. 6. –P. 784-793. DOI: 10.1016/j.jece.2017.12.056
12. R. Davis, H.M. Bryson, Levofloxacin. A Review of its Antibacterial Activity, Pharmacokinetics and Therapeutic Efficacy. *Drugs*, 1994. – 47 (4). – P. 677–700.
13. Khan A.A.P. et al. Studies on the oxidation of levofloxacin by N-bromosuccinimide in acidic medium and their mechanistic pathway, *Journal of Molecular Liquids*, 2016. – 218. – P. 604–610. DOI: 10.1016/j.molliq.2016.02.051

14. Sun, K., Dong, S., Sun, Y., Gao, B., Du, W., Xu, H., & Wu, J. Graphene oxide-facilitated transport of levofloxacin and ciprofloxacin in saturated and unsaturated porous media. *Journal of Hazardous Materials*, 2018. –348. – P. 92–99. DOI:10.1016/j.jhazmat.2018.01.032
15. Lyu, J., Ge, M., Hu, Z., & Guo, C. One-pot synthesis of magnetic CuO/Fe₂O₃/CuFe₂O₄ nanocomposite to activate persulfate for levofloxacin removal: Investigation of efficiency, mechanism and degradation route. *Chemical Engineering Journal*, 2020.–124456. DOI:10.1016/j.cej.2020.124456
16. Kariim I., Abdulkareem A.S., Abubakre O.K. Development and Characterization of MWCNTs from Activated Carbon as Adsorbent for Metronidazole and Levofloxacin Sorption from Pharmaceutical Wastewater: Kinetics, Isotherms and Thermodynamic Studies. *Scientific African*, 2019.– e00242
DOI: 10.1016/j.sciaf.2019.e00242
17. Ye Z., Zhang W., Lanzalaco S., Zhao L., Sir´es I. Ultra-uniform MIL-88B(Fe)/Fe₃S₄ hybrids engineered by partial sulfidation to boost catalysis in electro-Fenton treatment of micropollutants: Experimental and mechanistic insights. *Chemical Engineering Journal*, 2023. – 445. – 140575. DOI: 10.1016/j.cej.2022.140757
18. Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W. et al. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. *Pure and Applied Chemistry*, 1985.– 57 (4). – 603-619.
19. Когановский А.М., Клименко Н.А. Физико-химические основы извлечения поверхностно-активных веществ из водных растворов и сточных вод. Киев. Наукова думка. 1978. 174 с.
20. Shakeel, M., Mehmood, K., & Siddiq, M. Aggregation properties of levofloxacin in water and ethanol and its interaction with sodium dodecyl sulphate: A thermodynamic study. *Journal of Chemical Sciences*, 2015. – 127(11). – P. 2073–2079.
DOI: 10.1007/s12039-015-0975-y
21. Nakama, Y. Surfactants. *Cosmetic Science and Technology*, 2017. – P. 231–244. DOI:10.1016/b978-0-12-802005-0.00015-x

АДАПТАЦИЯ УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИХ МИКРООРГАНИЗМОВ К АБИОТИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ

**Брызгун В.Е., Венедюхина Е.П., Коробейникова А.С.,
Голубев Д.М., Нестеркина Д.Д.**

*Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского,
биологический факультет, Саратов, Россия
Gun1002001@gmail.com*

Большинство почвенных гетеротрофных бактерий приспособлены к оптимальными условиям, таким как температура 18-28°C, нейтральные значения pH (6,7-7,4) и низкое содержание солей в среде (0,1-0,3%). Однако эти значения могут значительно отличаться от оптимальных в условиях окружающей среды, особенно в районах крайнего севера и южных регионах, где годовая амплитуда температур может составлять 40-45°C. Некоторые виды микроорганизмов могут жить в крайне кислых или щелочных почвах, в то время как другие предпочитают нейтральную или слабокислую среду. Также встречаются грунты с высоким содержанием минеральных солей, токсичные условия которых не дают микроорганизмам развиваться [1].

Цель работы: изучить устойчивость углеводородокисляющих бактерий к различным абиотическим условиям.

Работа проводилась на базе кафедры микробиологии и физиологии растений СГУ имени Н. Г. Чернышевского. Объектами исследования являлись углеводородокисляющие бактерии, выделенные из почв г. Когалым (Ханты-Мансийский автономный округ, Тюменская область) в 2021-2022 гг.: *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Bacillus alcolophilus*, *B. funiculus*, *B. halodurans*, *B. niacini*, *B. psychrodurans*. Город Когалым находится в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО), Тюменской области и является основным нефтегазоносным районом России. Когалымский регион расположен на Западно-Сибирской равнине и представлен в основном зонами северной и средней тайги. Климат резко-континентальный, характеризующийся суровыми зимами и коротким прохладным летом. В связи с этим преобладает растительный покров типа сфагновых болот верховного типа

и лесная растительность, представленная в основном сосновыми лесами [2]. Почвы подзолистые и болотные, а по берегам рек - пойменные. Подзолистые почвы характеризуются белесым оттенком, бедны гумусом и питательными веществами, а из-за повышенной влажности обладают кислым рН среды. Пойменные же почвы обладают мощным гумусовым слоем и рН колеблющимся от 4 до 7 [3]. Отбор почвенных проб проводили сотрудники Центра исследования керна и пластовых флюидов Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени. Отбор и подготовку проб осуществляли в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 [4].

Таблица 1. Диапазон устойчивости микроорганизмов к физико-химическим факторам

Тест		Результаты, %	
		положительные	отрицательные
Температура культивирования, °С	10	66,6	33,3
	43	66,6	33,3
рН среды	1	0	100
	2	0	100
	3	66,6	33,3
	4	66,6	33,3
	5	66,6	33,3
	7	100	0
	9	100	0
	10	100	0
Концентрация NaCl, %	2	100	0
	5	66,6	33,3
	7	66,6	33,3
	10	50	50
	15	33,3	66,6

Для изучения устойчивости углеводородокисляющих микроорганизмов к различным температурным условиям осуществляли посев на ГРМ-агар (Оболенск, Россия) и культивировали при температуре 10 и 43 °С [33]. При изучении влияния водо-

родного показателя использовали ГРМ-бульон (Оболенск, Россия) с различными значениями рН (1, 2, 3, 4, 5, 9, 10) [5]. В случае изучения влияния концентрации хлорида натрия на рост углеводородоокисляющих бактерий использовали ГРМ-агар (Оболенск, Россия) с разной концентрацией NaCl (2, 5, 7, 10, 15 %). Культивирование осуществляли при температуре 28°C [6].

Результаты показали, из исследуемых штаммов 67% способны к росту в широком диапазоне температур от 10°C до 43°C. Все исследуемые штаммы предпочитают слабощелочные значения рН, 70 % штаммов устойчивы к росту в диапазоне рН от 3 до 5 (табл. 1).

Среди изученных штаммов 68 % предпочитают обитать в условиях с концентрацией солей, не превышающих 10 %. Только 32 % штаммов способны к росту при значениях солёности среды от 10 до 15 %. В ходе проделанной работы было выяснено, что штаммами, способными расти в широких диапазонах температур, оказались *B. niacini*, *B. psychrodurans*, *B. funiculus*. Наиболее ацидофильными штаммами являлись *B. niacini* и *B. halodurans*. Рост при высоких концентрациях солей осуществляли *B. niacini*, *B. psychrodurans* и *C. flaccumfaciens* (табл. 2).

Таблица 2. Способность роста бактерий при воздействии физико-химических факторов

Виды бактерий	рН среды							Температура, °С		Концентрация NaCl в среде, %				
	1	2	3	4	5	9	10	10	43	2	5	7	10	15
<i>C. flaccumfaciens</i>	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-
<i>B. alcolophilus</i>	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-
<i>B. niacini</i>	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>B. psychrodurans</i>	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+
<i>B. halodurans</i>	-	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-
<i>B. funiculus</i>	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-

Абиотические факторы в загрязненной почве могут варьироваться в широких пределах, в результате чего почвенные микроорганизмы вынуждены приспосабливаться к довольно жестким условиям. Как показали результаты, среди исследуемых

бактерий наиболее устойчивыми оказались бактерии рода *Bacillus*, а *B. psychrodurans* продемонстрировала максимальную пластичность к различным возможным вариантам условий внешней среды.

Широкий спектр приспособленности играет важную роль для потенциального использования данных бактерий в качестве основных составляющих препаратов для биоремедиации почв, способных быть активными в условиях широкого диапазона температур, при различных условиях солености и рН среды.

Литература:

1. Иванова Т.И., Кузьмина Н.П., Исаев А.П. Микробиологическая характеристика мерзлотных почв острова Тит-Ары (Якутия) // Сибирский экологический журнал, 2012, № 6, с. 831–840.
2. "География природных ресурсов и экологии нефтегазоносных провинций России" - Северо-Западный институт геологии, геофизики и минералогии им. Шувалова, Санкт-Петербург, 2019 г.
3. http://sge.susu.ru/bp/2018_v3_n1/2018v3n1_5_16.pdf (Почвы Кога-лымского района).
4. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: Межгосударственные стандарты. - М.: Стандартинформ, 2008. - 8 с.
5. Аветов Н.А., Шишконокова Е.А. Загрязнение нефтью почв таежной зоны Западной Сибири // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева, 2011, №68, с. 44-55.
6. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Под проф. ред. А. И. Нетрусов. М.: Академия. 2005.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ БАССЕЙНОВ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Бурмистрова М.Д.¹, Тимофеева Е.А.¹, Махов С.А.²

*¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия*

*²ООО «Полистрой», Москва, Россия
mdburmistrova@mail.ru*

Изучена сорбционная способность природных и искусственных компонентов, применяемых для очистки воды бассейнов. Антрацит, диатомит, цеолит, а также песок и стекло показали разную эффективность для широкого ряда элементов. При выборе способа технологии очистки воды бассейнов следует учитывать результативность веществ, отличающихся в среднем в 3 раза по отношению к тяжелым металлам.

Вода бассейна оказывает непосредственное влияние на здоровье человека. Наряду с оздоровительным эффектом существует возможность негативного влияния загрязнителей воды. Санитарно-гигиенические требования к качеству поступающей и содержащейся в плавательных бассейнах воды регламентируются СанПиН 2.1.2.1188-03. Для поддержания оптимального состояния и обеспечения качества воды в бассейнах применяются следующие методы очистки: химические (в том числе для подавления микробиологической активности), механические, физико-химические (в том числе сорбционные). Последние предлагают широкий перечень препаратов с разной степенью эффективности.

Одним из критериев эффективности сорбента является поглощающая способность, главным образом определяющая степень очистки воды. Сорбенты природного и искусственного происхождения обеспечивают почти полное удаление примесей, поэтому метод сорбции является перспективным способом очистки воды [1].

Сорбционные методы очистки показывают эффективность как при удалении трудноизвлекаемых, растворенных органических веществ, так и неорганических загрязняющих веществ, в т.ч. тяжелых металлов. Данный метод позволяет снизить содержание загрязнений в воде вплоть до предела обнаружения [3]. Именно

сорбционные методы применяются для вод с низкой концентрацией загрязнителей или в качестве доочистки после стадий механической и/или химической очистки для достижения гигиенических показателей. К преимуществам сорбционного метода относятся: возможность удаления загрязнений разной природы до остаточной концентрации независимо от их химической устойчивости; в большинстве случаев отсутствие вторичных загрязнений; управляемость процессом; возможность адсорбции веществ многокомпонентных смесей; высокая степень очистки, особенно слабokonцентрированных вод; возможность улавливания токсичных веществ при невысокой их концентрации [4].

Применяемые препараты, как природные (цеолит, диатомит и др.), так и искусственные (стекло), предварительно подвергаются обработкам: механическое измельчение, термическая и/или химическая модификация для получения высоких показателей адсорбции, при этом подбор обработок для различных видов загрязнений различаются, но количество обработок повышает стоимость процесса очистки [2]. Поэтому поиск дешевых и эффективных сорбентов – актуальная задача.

Расширение списка ионов тяжелых металлов, улавливаемых до высокой степени очистки при высокой концентрации загрязнения эффективно очищаемой воды, – еще одна задача современных сорбентов [2].

Целью данной работы является сравнение эффективности очистки воды бассейнов от тяжелых металлов природными сорбентами – антрацитом, диатомитом, цеолитом, и искусственными – песком и стеклом.

Схема проведения эксперимента анализа сорбционной способности для широкого спектра элементов приведена на рисунке 1. Вода из скважины, предназначенная для бассейна, была отобрана в 6 л пластиковую емкость. Было проведено два варианта опыта – с чистой водой и водой с добавлением активного хлора концентрации 1,8 мг/мл.

Эксперимент был проведен в трехкратной повторности для каждого варианта опыта с 5 сорбентами ниже:

1. 100% песок;
2. 100% стекло;
3. 100% цеолит;
4. 100% антрацит;
5. 100% диатомит;



Рисунок 1. Схема проведения эксперимента анализа сорбционной способности для широкого спектра элементов

Соотношение «сорбент:вода» соответствовало реальному значению для бассейнов и составляло 0,3:50. Сорбция проводилась при стандартных условиях в течение 24 часов. Затем проба фильтровалась, анализ воды был проведен методом ICP-OES.

В ходе эксперимента получены результаты:

Диатомит эффективен в отношении алюминия – от 2,5 до 8,4 раз, хрома в 2,2 - 2,5 раз и цинка в 1,7 раз.

Антрацит в отношении тяжелых металлов оказался малоэффективным.

Наиболее эффективным в отношении металлов оказался цеолит: барий от 1,8 до 4,0 раз, медь до 1,8, железо от 1,5 до 4,3 и калий до 1,7 раз. В воде с добавлением активного хлора цеолит также эффективен для марганца (от 2,1 до 3,6 раз) и хрома (от 1,9 до 2,8 раз).

Можно сделать вывод, что наибольшую эффективность в отношении тяжелых металлов проявляет цеолит. Для эффективной очистки воды бассейна следует использовать смесь, в которой содержатся все эти компоненты, поскольку их эффективность различается. Это будет способствовать более полному очищению воды от тяжелых металлов, железа и от элементов, отвечающих за кислотность. Бассейны будут медленнее покрываться налетом из железа, а вода в них будет более безопасной с санитарно-гигиенической точки зрения.

Также было проведено определение площади поверхности сорбентов для определения сорбционной способности. Результаты испытаний по низкотемпературной адсорбции азота для измерения площади поверхности приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний BET Surface Area

Наименование вещества	Площадь поверхности, м ² /г	Отношение к площади поверхности стекла	Отношение к площади поверхности песка
Цеолит	23,71	28,5	47,4
Диатомит	3,62	4,4	7,2
Антрацит	2,32	2,8	4,6
Стекло	0,83	1	1,7
Песок	0,5	0,6	1

Наибольшей площадью поверхности обладает цеолит (23,71 м²/г), а наименьшей – песок с результатом 0,5 м²/г. На данном этапе можно сделать вывод, что наибольшую сорбционную способность проявляет цеолит.

Исходя из таблицы 1 видно, что площадь поверхности природных сорбентов выше от 2,8 до 47,4 раз по сравнению с песком и стеклом, что приводит к повышению эффективности сорбции ряда компонентов.

Использование сорбентов при очистке воды бассейнов является эффективным способом для повышения качества воды и поддержания ее оптимального состояния. Для более эффективной работы смесей для очистки бассейнов от тяжелых металлов рекомендуется применять смеси сорбентов с высоким соотношением цеолита к диатомиту и антрациту, при этом искусственные сорбенты (стекло, песок) для большинства металлов менее эффективны.

Литература

1. Лаптедутье Н. К., Дремичева Е. С. Сравнительная оценка эффективности сорбционной очистки сточных вод от тяжёлых металлов //Вода: химия и экология. – 2014. – №. 12. – С. 81-87.

2. Малкин П. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью наноактивированных комплексов природного цеолита и диатомита // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Том 10, № 2. – С. 21–41. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-2-21-41](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-2-21-41).
3. Назаров А.М., Латыпова Ф.М., Арасланова Л.Х., Сальманова Э.Р., Туктарова И.О. Исследование эффективности природных и модифицированных сорбентов для очистки промышленных сточных вод от ионов тяжелых металлов // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Том 10, № 5. – С. 125–143. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-125-143](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-5-125-143).
4. Обуздина М. В., Руш Е. А., Шалунц Л. В. Решение экологических проблем очистки сточных вод путем создания сорбента на основе цеолита // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21. – № 8. – С. 20-25.

СОРБЦИОННАЯ БИОРЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ОРГАНИЧЕСКИМИ ПОЛЛЮТАНТАМИ РАЗНЫХ КЛАССОВ

Васильева Г.К.
Приглашенный лектор

*Институт физико-химических и биологических проблем
почвоведения РАН, ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пушкино, Московская обл.,
Россия
Gkvasilyeva@rambler.ru*

В настоящее время проблема химического загрязнения окружающей среды становится все более актуальной. Насчитываются тысячи различных загрязнителей, большинство из которых аккумулируется в почве. Для Российской Федерации весьма актуальна проблема локального загрязнения почв органическими поллютантами, среди загрязняющих веществ наибольшую проблему для земельных угодий представляют так называемые приоритетные поллютанты. К ним относят стойкие нефтепродукты, содержащие полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), пестициды, суперэкоотоксиканты, тяжёлые металлы и радионуклиды [1]. Это обуславливает необходимость разработки эффективных и экономичных методов рекультивации загрязнённых территорий. К настоящему времени накоплен большой опыт биорекультивации загрязнённых земель, основанный на способности почвенной микрофлоры утилизировать разнообразные органические поллютанты. Однако, несмотря на экономические и экологические преимущества этого метода, выбор между сжиганием или захоронением на полигонах и биологической очисткой далеко не всегда делается в пользу последней. Причины ограниченного применения метода биоремедиации связаны с повышенной токсичностью почв, неблагоприятными климатическими и физико-химическими условиями, длительностью процесса и возможностью миграции поллютантов в грунтовые и поверхностные воды.

В ходе более чем 30-тилетних исследований, проведенных в ИФХиБПП РАН, совместно с коллегами из ИНМИ РАН, ИБФМ РАН, ИПЭС РАН, факультета почвоведения и химического фа-

культета МГУ, ЮФУ в Ростове-на-Дону, а также 2-х университетов США (Penn State University и Nebraska State University in Lincoln), Испании (IRNAS, Seville), Финляндии (University of Helsinki) была разработана концепция технологии сорбционно-биологической очистки почв, которая заключается в дифференциальном подходе к рекультивации почвы в зависимости от качественного и количественного состава загрязнителей и типа почвы. При этом поллютанты подразделяют на деградабельные, способные расти на среде с этими химикатами в качестве единственных источников углерода и энергии, и стойкие органические загрязнителя, способные медленно разлагаться микроорганизмами только в соокислительных условиях.

1. При загрязнении почвы деградабельными загрязнителями (нефть и нефтепродукты, хлорированные и низко хлорированные поллютанты, включая часть пестицидов, фенолы, анилины, 2-3-ядерные ПАУ и др.) предлагается проводить очистку почвы методом биоремедиации. При этом, возможны следующие подходы.

1.1. При умеренном загрязнении почв (до 500-10000 мг/кг в зависимости от поллютанта) можно использовать классический метод биоремедиации, основанный на приемах агрокультурации (вспашка, рыхление, увлажнение, внесение минеральных или органических удобрений), а при необходимости и биопрепаратов на основе специфических микроорганизмов-деструкторов.

1.2. При сильном загрязнении почв деградабельными поллютантами предлагается использовать метод сорбционной биоремедиации, который базируется на дополнительном внесении натуральных сорбентов. Их роль заключается в снижении фито- и биотоксичности почв за счет преимущественно обратимой сорбции поллютантов и их токсичных метаболитов, а также в улучшении структуры почв и создании оптимальных аэрогидротермических условий для развития почвенной микрофлоры и роста растений в случае доочистки почвы с помощью фиторемедиации. Кроме того, сорбенты обеспечивают локализацию загрязнителей в очищаемом слое почвы, что в случае поверхностного загрязнения позволяет проводить очистку в условиях *in situ*, т.е. непосредственно на загрязненном участке, минуя наиболее дорогостоящие этапы по экскавации и транспортировке к месту утилизации. Рассмотрим ряд примеров использования этого метода для очистки почв от деградабельных поллютантов.

1.2.1. Сорбционная биоремедиация почв при аварийном загрязнении пестицидами. Впервые метод сорбционной биоремедиации был применен при ликвидации последствий аварийной утечки 17 тонн пропанида на с/х аэродроме в Краснодарском крае. Этот гербицид (3,4-дихлорпропиоанилид) до конца 1980-х годов широко использовался в СССР при выращивании риса и хлопка. Однако, в ходе микробного разложения пропанида в почве накапливался стойкий метаболит 3,4-дихлоранилин (ДХА), что стало причиной запрета на его применение. В результате адаптации почвенной микрофлоры при многолетнем применении пропанида в почвах рисовников произошло накопление микроорганизмов-деструкторов хлоранилинов (МДХА), способных использовать ДХА в качестве ростового субстрата. Ряд таких микробных штаммов был выделен сотрудниками ИНМИ РАН [2, 3]. Однако, из-за образования высокотоксичного промежуточного метаболита (4,5-дихлорпирокатехин) рост этих микроорганизмов оказался возможен только при концентрациях ДХА в жидкой среде не более 50-150 мг/л (т.е. около 1000 мг/кг почвы).

При ликвидации аварийной утечки в почву был внесен гранулированный активированный уголь (ГАУ) в комплексе с биопрепаратом на основе *Pseudomonas diminuta* шт. ИНМИ КС-7 и *Paracoccus denitrificans*, что резко повысило активность инокулированных МДХА и ускорило разложение ДХА. Уже к концу первого сезона его концентрация снизилась с 12.000 до 200 мг/кг, а участок зарос дикими травами [4].

1.2.2. Сорбционная биоремедиация почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Эти поллютанты на 80-90% состоят из углеводов нефти (УВН), большинство из которых относятся к деградабельным соединениям. Углеводородокисляющие микроорганизмы распространены практически повсеместно, и в случае нефтяного загрязнения при определенных условиях (температура 10-35⁰С, достаточная увлажненность почвы, рН в интервале 5,5-7,5, аэрация, наличие необходимых биогенных элементов) начинается процесс самоочистения почв. Для ускорения этого процесса используют приемы биоремедиации: внесение биопрепаратов, биофильных элементов для создания оптимального соотношения С:N:P:K=30÷50:1:1:1 и доломитовой муки для предотвращения подкисления почвы. Однако, при повышенной концентрации УВН (>3-5%) происходит ингибирование

нефтедеструкторов, как аборигенных, так и инокулированных, и процесс резко тормозится.

В ходе наших многолетних экспериментов, проводимых на разных типах почв Европейской части РФ (серая лесная, аллювиальная луговая и чернозем выщелоченный) и минеральных почв Западной Сибири (глеево-подзолистая, подзол иллювиально-железистый и литострат песчаный), загрязненных нефтью, отработанным моторным маслом или дизельным топливом в дозах 5-15 масс%, установлено следующее.

Основной причиной повышенной токсичности нефтезагрязненных почв является накопление токсичных промежуточных продуктов микробного окисления углеводородов, обладающих повышенной водорастворимостью, подвижностью и токсичностью. Натуральные сорбенты, в том числе углеродистые (активированный уголь и биочар); органические (торф, древесные опилки, Спиллсорб, растительные остатки) и минеральные (карбоксил, цеолит, каолинит, вермикулит, диатомит), способны существенно ускорять процесс биоремедиации. При повышенном или застарелом загрязнении, когда микрофлора почв угнетена, положительную роль может сыграть дополнительное внесение биопрепаратов на основе штаммов микроорганизмов-нефтедеструкторов (Родэр, Деворойл, Микробак и др.), однако во многих случаях возможно проведение очистки почвы путем активации аборигенных нефтедеструкторов.

В ходе наших исследований был разработан смешанный сорбент АУД на основе ГАУ и диатомита, а также композитный сорбент АУДТ на основе торфа верхового, ГАУ и диатомита. Первый сорбент оказался наиболее эффективен при биоремедиации глинистых и легкоглинистых почв [5-10], а в случае малогумусированных песчаных почв Западной Сибири наибольший эффект был получен при внесении композитного сорбента [11]. Показано, что наряду со снижением токсичности почв за счет сорбции поллютантов эти сорбенты в течение всего времени обработки поддерживают оптимальную влажность почв, кислотность, близкую к нейтральной и повышают устойчивость растений к нефтяному загрязнению. При правильном подборе формы и дозы сорбентов можно существенно ускорить процесс биоремедиации нефтезагрязненных почв и одновременно минимизировать миграцию токсикантов и прежде всего их продуктов окисления, обладающих большей водорастворимостью и

подвижностью, а также более высокой токсичностью, чем углеводороды нефти. Доказано также, что в присутствии сорбентов не происходит значительного накопления углеводородов, включая канцерогенные компоненты в виде ПАУ, в том числе бенз(а)пирен [9].

Сравнительный эколого-экономический анализ показал, что стоимость *in situ* биоремедиации нефтезагрязненных почв – около 1-4,3 млн. руб./га (в ценах 2018 г.) в зависимости от стоимости биопрепарата, что на порядок ниже по сравнению с наиболее часто используемым физическим методом рекультивации путем замены загрязненного слоя чистым грунтом с последующей утилизацией экскавированной почвы силами специализированных организаций, которая колеблется в пределах от 10 до 62 млн. руб./га, в зависимости от их удаленности. Однако применение классического метода биоремедиации не всегда эффективно. Стоимость сорбционно-биологического метода в 2-3 раза превышает стоимость биологической очистки и колеблется в пределах от 6 до 35 млн. руб./га в зависимости от сорбента. Тем не менее, в большинстве случаев его применение экономически оправдано [12].

2. При загрязнении почв стойкими органическими загрязнителями (СОЗ) предлагается применять комплексный подход. Рекультивацию почв, загрязненных стойкими поллютантами, также можно проводить с помощью сорбционной биоремедиации, которая обеспечивает ускоренное биоразложение части деградируемых загрязнителей и прочное связывание особо стойких органических поллютантов. Образование прочно связанных соединений может происходить двумя путями: 1) в результате частичной трансформации соединений с последующей полимеризацией и связыванием продуктов трансформации почвенным гумусом или сорбентом и 2) за счет образования двухсторонних π - π -связей между молекулами поллютанта и поверхностью пор в нанопоровом пространстве углеродистых сорбентов.

2.1. Индивидуальные малодеградируемые соединения. Примером таких загрязнителей является взрывчатое вещество 2,4,6-тринитротолуол (ТНТ). В окрестностях военного завода в шт. Небраска (США) со времен 2-й мировой войны и вплоть до 1990-х годов сохранялись почвы, загрязненные ТНТ и продуктами его трансформации, которые полностью подавляли рост растений. Показано, что внесение ГАУ ускоряет очистку почв,

загрязненных высокими концентрациями ТНТ (500-2000 мг/кг). Ранее было известно, что ТНТ под действием ряда аборигенных почвенных микроорганизмов восстанавливается до нитрозо- и гидроксиламино-производных, которые затем конденсируются с образованием токсичного продукта – тетранитро-диметил-азокси-бензола. Однако в присутствии ГАУ, наряду с микробным окислением ТНТ происходит также каталитическое окисление его молекул на поверхности частиц ГАУ с образованием стойких радикалов, которые затем взаимодействуют с продуктами частичного окисления ТНТ с образованием нетоксичных соединений, связанных во внутрипоровом пространстве почвенно-угольного матрикса [13].

2.2. Стойкие органические загрязнители в виде гетерогенных смесей. К ним относятся большинство СОЗ, состоящие из деградабельных и малодеградабельных (высокостойких) компонентов, в том числе смеси устаревших пестицидов (ДДТ, ГХЦГ и др.) в местах их захоронений, широко используемые ранее электрохимические жидкости на основе полихлорированных бифенилов (ПХБ), а также продукты горения органических (ПАУ) или хлорорганических (диоксины) соединений.

2.2.1. Сорбционная биоремедиация почв, загрязненных устаревшими хлорорганическими пестицидами. Исследования, проведенные совместно с ЮФУ и ФГБУ ГЦАС "Ростовский", показали, что на территории Батайского полигона захоронения устаревших пестицидов концентрации ГХЦГ, ДДТ и его метаболитов в почве многократно превышают допустимые уровни. Установлено, что внесение ГАУ или биочара может существенно снизить концентрации пестицидов в почве за счет их частичного разложения и связывания, а также резко уменьшить их накопление в надземной массе растений, что обеспечивает резкое снижение токсичности почв уже в конце первого сезона [14].

2.2.2. Сорбционная биоремедиация почв, загрязненных полихлорированными бифенилами (ПХБ). Другим примером высокостойких органических загрязнителей являются ПХБ, которые до 1990 г. широко использовались в качестве диэлектрических жидкостей при производстве электротехнического оборудования. Из-за несовершенства технологий и высокой стойкости ПХБ, почва и донные отложения водоемов в местах их производства оказались сильно загрязнены. До настоящего времени, в некоторых местах уровни загрязнения почв этими поллютантами

в сотни и тысячи раз превышают ПДК [15]. В ходе сорбционной биоремедиации почвы, исторически загрязненной ПХБ (суммарное содержание ПХБ 140-4000 мг/кг, завод «Конденсатор» в г. Серпухов), в присутствии ГАУ наблюдалось микробное разложение низкохлорированных конгенов ПХБ (3ХБ и 4ХБ), и одновременно становилась малодоступной значительная часть конгенов ПХБ с 4-7 атомами хлора в результате прочного связывания планарных конгенов в нанопоровом пространстве ГАУ. При этом параллельно наблюдается каталитическое дехлорирование высокохлорированных конгенов на поверхности частиц ГАУ. В итоге произошло резкое снижение токсичности загрязненных почв и миграции токсикантов в сопредельные среды [16]. Разработан метод фиторемедиации этих почв на фоне внесения биококка – продукта пиролиза осадков сточных вод [17].

Финансирование. Работа поддержана грантами РФФИ №16-05-00617-А, 07-05-11-002-ано, 19-29-05265мк.

Литература

1. Государственный доклад Мин. Природы РФ «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». Мин. прир. ресурсов и экологии РФ, 2021, https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklaatsii_v_2020
2. Суровцева Э.Г., Ивойлов В.С., Карасевич Ю.Н., Васильева Г.К. Хлорированные анилины - источник углерода, азота и энергии для *Pseudomonas diminuta* // Микробиология. 1985, 54(6), с. 948-952.
3. Васильева Г.К., Суровцева Э.Г. Распространенность микроорганизмов-деструкторов хлоранилинов в воде и почве // *Микробиология*, 1988, 57(3), с. 464-471.
4. Васильева Г.К., Суровцева Э.Г., Белоусов В.С. Микробиологический метод очистки почв, загрязненных пропанидом и 3,4-дихлоранилином // *Микробиология*. 1994, 63(1), с. 129-144.
5. Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Бочарникова Е.А., Семенюк Н.Н., Яценко В.С., Слюсаревский А.В., Барышникова Е.А. Нефть и нефтепродукты как загрязнители почв. Технология комбинированной физико-биологической очистки загрязненных почв // *Российский химический журнал*. 2013, 57(1), с. 79-104.

6. Semenyuk N.N., Yatsenko V.S., Strijakova E.R., Filonov A.E., Petrikov K.V., Zavgorodnyaya Yu. A., Vasilyeva G.K. Effect of activated charcoal on bioremediation of diesel fuel contaminated soil // *Microbiologia*. 2014, 83(5), p. 589–598.
7. Kondrashina, V., Strijakova, E., Zinnatshina, L., Bocharnikova, E., Vasilyeva, G. Influence of activated carbon and other additives on bioremediation rate and characteristics of petroleum-contaminated soils // *Soil Science (Special issue)*. 2018, 138(4), p. 150-159.
8. Vasilyeva, G., Kondrashina, V., Strijakova, E., Ortega-Calvo, J-J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil // *Sci. Total Environ.*, 2020, 706, No135739.
9. Vasilyeva G.K., Mikhedova E.E., Zinnatshina L.V., Strijakova E., Sushkova S.N., Akhnetov L.A. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil // *Sci. Total Environ.* 2022, 850, №157952.
10. Myazin V.A., Korneikova M.V., Chaporgina A.A., Fokina N.V., Vasilieva G.K. Bioremediation of contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic // *Microorganisms*. 2021, 9(8), №1722.
11. Михедова Е.Е., Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Узорина М.И., Ахметов Л.И. Влияние натуральных сорбентов на скорость биоремедиации глеево-подзолистой почвы северной части Западной Сибири // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023, №3, с. 4-9.
12. Слюсаревский А.В., Зиннатшина Л.В., Васильева Г.К. Сравнительный эколого-экономический анализ методов ремедиации нефтезагрязненных почв путем биорекультивации *in situ* и механической замены грунта // *Экология и промышленность России*. 2018, 126, с. 57-68.
13. Vasilyeva G.K., Kreslavski V.D., Shea P.J., Oh B.T. Potential of activated carbon to decrease 2,4,6-trinitrotoluene toxicity and accelerate soil decontamination // *Environ. Toxicol. Chem.* 2001, 20(5), p. 965-971.
14. Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Пашковская О.Г., Минкина Т.М. / *Степная Евразия. Устойчивое развитие*. 2022 г. Ростов-на-Дону – Таганрог, Изд. ЮФУ, 2022, с. 25-27.
15. Лапушкин М.И., Лукьянова Н.Н., Васильева Г.К., Многолетний мониторинг миграции и трансформации полихлорированных бифенилов на исторически загрязненном участке в г. Серпухов // *Использование и охрана природных ресурсов России*. 2020, №4(164), с. 75-80.

16. Vasilyeva G.K., Strijakova E.R., Nikolaeva S.N., Lebedev A.T., Shea P.J. Dynamics of PCB removal and detoxification in historically contaminated soils amended with activated carbon // Environ. Pollut. 2010, 158(3), p. 770-777.
17. Лапушкин М.Ю., Васильева Г.К., Лукьянова Н.Н., Коломийцев Н.В., Кошелев А.В. Способ фиторемедиации почв, загрязненных полихлорированными бифенилами. Патент на изобретение РФ №2774078. Заявка № 2021131014, от 25.10. 2021 г.

АНТАГОНИСТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИХ БАКТЕРИЙ, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ПОЧВ Г. КОГАЛЫМА

*Венедюхина Е.П., Нестеркина Д.Д., Голубев Д.М.,
Брызгун В.Е., Коробейникова А.С.*

*Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия
yvenedyukhina@bk.ru*

Одним из самых распространённых последствий загрязнения окружающей среды поллютантами (тяжелые металлы, пестициды, нефть и продукты ее переработки) является изменение экологических и продовольственных свойств почвы [1, 2].

Нередко уровень загрязнения почвы носит масштабный характер, что приводит к необходимости использования эффективных методов, способствующих ее восстановлению. Самым перспективным направлением в технологиях рекультивации почвенных систем, загрязненных органическими поллютантами, считается биодеструкция [3]. Поиск новых штаммов деструкторов в будущем поможет решить проблему ремедиации почв в короткие сроки. Изучение способности этих бактерий к антагонистическим взаимоотношениям с почвенной микробиотой поможет выявить каковы будут взаимодействия между биодеструкторами и аборигенными популяциями.

Целью работы являлось изучение антагонистической активности углеводородокисляющих бактерий, выделенных из почв г. Когалыма по отношению к гетеротрофным микроорганизмам

Работа проводилась на базе кафедры микробиологии и физиологии растений СГУ имени Н.Г. Чернышевского. В работе были использованы штаммы углеводородокисляющих бактерий, выделенные из почвенных проб, отобранных на территории г. Когалыма (Ханты-Мансийский автономный округ, Тюменская область): *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Bacillus alcolophilus*, *B. funiculus*, *B. halodurans*, *B. niacini*, *B. psychrodurans*. В качестве тест культур были использованы гетеротрофные микроорганизмы, также выделенные из почвы г. Когалыма: *Aureobacterium barkeri*, *A. liquefaciens*, *B. decolorationis*, *B. lentus*, *B. okuhidensis*, *B. psychrotolerans*, *Kurthia zopfii*, *K. gibsonii*.

Антагонистическую активность углеводородокисляющих бактерий определяли методом агаровых блоков. Исследуемые штаммы и тест-культуры бактерий выращивали на плотной среде ГРМ-агар (Россия, Оболенск) при температуре 28°C. Из исследуемых тест-культур готовили взвеси в стерильном физиологическом растворе по стандарту мутности 10 единиц и проводили посев газоном. Далее вырезали агаровые блоки с исследуемыми штаммами, которые с помощью стерильного скальпеля раскладывали на чашки Петри с газонами бактерий. Раскладывали по 3 блока на каждую чашку Петри на равном расстоянии друг от друга, плотно прижимая к поверхности среды. Посевы инкубировали при температуре 28°C 24-48 ч. По окончании времени культивирования измеряли диаметры зон ингибирования роста тест-культур в миллиметрах (мм).

Результаты исследований показали, что большинство исследуемых штаммов углеводородокисляющих бактерий обладали антагонистической активностью по отношению к тест-культурам (табл. 1).

Таблица 1. Антагонистическая активность углеводородокисляющих бактерий, выделенных из почв г. Когалым, по отношению к гетеротрофным бактериям ($M \pm m$, $p \leq 0,05$)

Виды бактерий	Диаметр зоны ингибирования, мм							
	<i>B. decolorationis</i>	<i>B. psychrotolerans</i>	<i>B. lentus</i>	<i>B. okuhidensis</i>	<i>A. barkeri</i>	<i>A. liquefaciens</i>	<i>K. zoefii</i>	<i>K.gibsonii</i>
<i>C. flaccumfaciens</i>	20,0±3,1	0	0	0	12,3±2,3	0	0	0
<i>B. alcolophilus</i>	0	23,0±3,1	0	0	10,0±0,5	0	0	0
<i>B.funiculus</i>	32,0±2,7	0	0	0	20,0±3,1	0	0	11,0±0,8
<i>B. halodurans</i>	23,3±2,1	40,0±2,9	0	0	9,5±1,0	23,0±4,0	0	10,1±1,2
<i>B. niacini</i>	20,1±2,7	0	0	0	0	0	0	0
<i>B. psychrodurans</i>	0	33,0±4,0	0	0	20,0±1,4	12,0±1,9	0	0

Бактерии рода *Bacillus* проявляют выраженные антагонистические свойства, подавляют рост 40 % тест-культур. Низкую антагонистическую активность показали бактерии *C. Flaccumfaciens* и *B. alcolophilus* – они подавляют только два вида исследуемых штаммов гетеротрофных микроорганизмов, а *B. niacini* оказывает негативное влияние на рост только одного штамма. Высокая антагонистическая активность отмечается для *B. Psychrodurans* и *B. funiculus*, которые подавляют бактерии трех видов гетеротрофных микроорганизмов, а *B. halodurans* угнетает рост пяти видов гетеротрофных микроорганизмов.

Бактерии рода *Bacillus* способны синтезировать большое количество бактериоцинов, которые угнетают рост других микроорганизмов. Это вещества белковой природы, синтезируемые в рибосомах и выделяемые клеткой в форме биологически активных пептидов, обладающих бактериоцидным и бактериостатическим действием. Бактериоцины, как правило, оказывают антимикробное действие в результате влияния на поверхностные структуры бактерий, ингибируя синтез клеточной стенки и формирование пор, что завершается гибелью организма [4]. Антагонистический эффект также может быть связан со скоростью роста, в результате чего один вид бактерий подавляет жизнедеятельность другого [5].

Способность бактерий образовывать антимикробные вещества в почвенном сообществе может подавлять рост фитопатогенных бактерий и, тем самым, защищать растения от болезней [6]. По литературным данным, наиболее эффективными являются биопрепараты на основе нескольких культур, их преимущество по сравнению с монофазными препаратами, заключается в большей эффективности и наработкой биомассы [7]. К тому же, нефтепродукты являются очень сложными субстратами и для их разложения необходимо наличие разнообразных ферментных систем, поэтому актуально создание консорциумов бактерий-деструкторов. Важно также, безвредное действие аборигенов на сапрофитную микрофлору загрязненной почвы [8]. Исходя из вышеперечисленных результатов, относительно безопасными штаммами для почвенной микрофлоры являются *C. Flaccumfaciens*, *B. alcolophilus*, *B. niacini*.

Литература

1. Акименко Ю.В. Оценка устойчивости экологических функций почв к загрязнению антибиотиками // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017, Т. 19, № 2, с. 207-210.
2. Нгун Т.К. Эколого микробиологические особенности антропогенно-преобразовательных степных почв с разными магнитными и термомагнитными свойствами: дис. канд. биол. наук. Саратов, 2019. 170 с.
3. Филиппова А.С., Акимова А.С. Загрязнение почвы и биологические методы ее очистки // Международный научно-исследовательский журнал. 2022, № 11, с. 1-2.
4. Заславская М.И. Перспективы использования бактериоцинов нормальной микробиоты в антибактериальной терапии (обзор) // Современные технологии в медицине, 2019, №11, с. 136-150.
5. Басалаева Д.Л. Антагонистическая активность бактерий *Bacillus velezensis* // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Химия. Биология. Экология, 2022, Т. 22, №1, с. 57-63.
6. Павлюшин В.А., Новикова И.И., Бойкова И.В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор) // Сельскохозяйственная биология, 2020, №3, с. 421-438.
7. Ветрова А.А. Биодеструкция нефти отдельными штаммами и принципы составления микробных консорциумов для очистки окружающей среды от углеводов нефти // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки, 2013, №2, с. 241-257.
8. Сундет Т.Р. Влияние биопрепаратов на здоровье почвы и сельскохозяйственную продукцию // Почвоведение и агрохимия, 2023, № 1, с. 86-104.

ПРИМЕНЕНИЕ ОТХОДОВ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В ЦЕЛЯХ РЕКУЛЬТИВАЦИИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Вишневский В.Д.

*РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия
vlad_cat01@mail.ru*

В условиях постоянно сокращающихся природных ресурсов использование первичного сырья в качестве материалов для рекультивации загрязненных и нарушенных земель является расточительным и нецелесообразным. Применение вторичных материальных ресурсов, полученных в результате обработки и утилизации отходов производства и потребления, решает сразу две проблемы: нехватки дешевого сырья для рекультивации и утилизации отходов производства и потребления. Огромный перечень отходов, образующихся в различных отраслях промышленности, открывает широкие возможности для выбора материалов при разработке технического и биологического этапов плана рекультивации загрязненных и нарушенных земель.

Одной из исторически развитых отраслей промышленности в Российской Федерации является лесопромышленный комплекс (ЛПК). Производственный цикл переработки древесины осуществляют лесозаготовительные, лесопильные, деревообрабатывающие, целлюлозно-бумажные, гидролизные и лесохимические предприятия. На каждом из перечисленных предприятий образуется большое количество разнообразных отходов, зачастую, требующих индивидуальных подходов к утилизации [1].

В процессе лесозаготовки образуются сучья, ветки, вершинки, пни, корни, шишки, хвоя, кора. Из общей массы дерева лишь 82% приходится на древесную часть и поступает на лесозаготовку, 15% остатка составляет кора, а 3% - древесная зелень. Около 65% дерева составляет ствол, который является главным объектом лесозаготовительного производства. Крону, часть ствола, вершину, сучья, пни и корни оставляют на лесосеке в качестве отходов лесозаготовок. Число таких отходов колеблется от 30 до 50% в общей биомассе [2].

Деревообрабатывающая промышленность также производит внушительное количество отходов. Большая часть деревообрабатывающих заводов по окончании реализации производства оставляет примерно от 25 до 40% отходного сырья, которое не используется, размещается на полигонах. К основным отходам деревообработки относятся откомлевки, опилки, неликвидная древесина, рейки, горбыли, трещиноватая древесина, стружка, щепа, шлифовальная пыль и остатки готового материала. Лесохимическая отрасль помимо вышеупомянутых отходов образует также лигнин [3].

Даже краткая классификация отходов ЛПК показывает, что образующиеся на предприятиях промышленности отходы представляют собой смесь высокодисперсных органических соединений полимерного строения, которые могут являться носителем полезных для почвы веществ или сами выступать в роли питательного органического вещества. Это открывает возможность их применения для рекультивации и восстановления нарушенных и загрязненных земель [4].

Одним из известных методов биологического этапа рекультивации является биостимулирование, суть которого заключается во внесении дополнительных питательных веществ в почву для стимулирования развития ее почвенного биоценоза. Древесные отходы могут выступать в качестве такого материала. Смешение нефтезагрязненной почвы с древесной щепой и орошение водой повышает ее аэрацию и способствует равномерному распределению питательных веществ, что, в свою очередь, активнее стимулирует биодеградацию нефтяных углеводородов. В качестве древесной щепы можно использовать отходы ЛПК. Применение такого метода биоремедиации нефтезагрязненной почвы позволяет добиться удаления практически 60% общего содержания углеводородов нефти [5].

Древесные отходы также могут выступать в роли носителей для биопрепаратов, а также мульчирующих материалов, которые благоприятствуют процессу микробиологической деградации углеводородов нефти в почве, при этом не препятствуя поступлению к ним атмосферного воздуха. Древесный опил с нанесенным на него биопрепаратом способствует созданию на своей поверхности мульчирующего слоя, защищающего процесс биоремедиации от воздействия климатических

факторов. Он также стабилизирует температурный режим работы биодеструктурирующих микроорганизмов [4,5].

Использование соснового опила для очистки от нефтяного загрязнения в процессе фиторекультивации показало, что прирост длины ростков овса составляет 24-65% по сравнению с внесением биопрепарата методом дождевания. Однако, установлено, что мелкофракционный сосновый опил может негативно влиять на процесс биоремедиации, что связано с ускоренным гниением древесины, который сопровождается выделением токсических компонентов [4].

Отходы лесозаготовки также можно применять в качестве сорбирующих материалов (СМ) для связывания углеводов в нефтезагрязненных участках почвы. Для производства СМ из древесных отходов лесозаготовки, а именно хвои и шишек, можно использовать комбинированный физико-химический метод, заключающийся в обработке сырья растворами гидроксида натрия или фосфорной кислоты с последующей термообработкой. Такая технология позволяет получить гидрофобные, нефтемки и дисперсные СМ, которые можно применять не только для ликвидации последствий разливов нефти и нефтепродуктов, но и для рекультивации сильнозагрязненных нефтью земель. Также СМ из древесных отходов могут выступать в роли мелиоранта при проведении рекультивации [6,7].

Таким образом, можно отметить, что существуют различные способы применения отходов ЛПК при рекультивации нефтезагрязненных земель. Вовлечение вторичных материальных ресурсов в процесс рекультивации позволит минимизировать затраты на приобретение первичных материальных ресурсов и избежать захоронения древесных отходов на полигоне. Кроме того, география размещения предприятий ЛПК позволяет оптимизировать маршруты транспортирования древесных отходов к восстанавливаемым нефтезагрязненным территориям.

Литература

1. Романов, В. В. Современное состояние и перспективы развития лесопромышленного комплекса / В. В. Романов // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2013. – № 2(36). – С. 37-46.

2. Харлова, И. С. Возможности получения товарной продукции из отходов лесозаготовок в условиях лесозаготовительного предприятия / И. С. Харлова, О. К. Пузырева, А. П. Мохирев // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Сборник статей студентов, аспирантов и молодых ученых по итогам Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Красноярск, 19–20 мая 2016 года. – Красноярск: Сибирский государственный технологический университет, 2016. – С. 168-171
3. Отходы деревообработки. [Электронный ресурс] // Wood-prom. – URL: http://wood-prom.ru/analitika/15274_otkhody-derevoobrabotki (дата обращения 06.07.2023)
4. Малахова Ю. В. Разработка экологически безопасных способов ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде в Арктической зоне: дис. ... кан. техн. наук. – М.: 2022. – 187 с.
5. Innocent Chukwunonso Ossai, Aziz Ahmed, Auwalu Hassan, Fauziah Shahul Hamid Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review // Environmental Technology & Innovation. – 2020. – №17. – p. 42
6. Вторичное использование отходов предприятий лесопромышленного комплекса / С. В. Мещеряков, И. С. Еремин, В. Д. Вишневский, Г. К. Каримов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2022. – № 2(305). – С. 64-70. – DOI 10.33285/2411-7013-2022-2(305)-64-70. – EDN TNEUXM.
7. Еремин, И. С. Использование шишек ели обыкновенной в качестве адсорбента для ликвидации разливов нефти / И. С. Еремин, Г. К. Каримов, В. Д. Вишневский // Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса: сборник материалов Международной научно-практической конференции посвященной памяти академика РАН В.П. Зволинского и 30-летию создания ФГБНУ «ПАФНЦ РАН», Солонное Займище, 10–12 августа 2021 года / Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук. – Солонное Займище: Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН, 2021. – С. 744-747. – EDN MBRJIF.

БИОДЕГРАДАЦИЯ ОТРАБОТАННОГО СИНТЕТИЧЕСКОГО МОТОРНОГО МАСЛА В ПОЧВЕ БИОРГАНИЧЕСКОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ

Герцен М.М., Переломов Л.В.

*Тульский государственный университет имени Л.Н.Толстого,
лаборатория химии и экологии почв, Тула, Россия
mani.gertsen@gmail.com*

Отработанные синтетические моторные масла (ОСММ) – токсичные продукты, имеющие невысокую степень биоразлагаемости (10-30%) и являющиеся опасными отходами, подлежащими обязательному сбору и утилизации. На территории РФ до 70% всех отработанных масел нелегально сбрасывается в почву и водоемы, 30% - собирается, но из всех собранных отработанных масел только 14% идет на регенерацию, а остальные 16% используются как топливо или сжигаются [1]. Существующие технологии очистки загрязненных экосистем от синтетических отработанных моторных масел *in situ* эффективны при низком уровне загрязнения и связаны с внесением диспергирующих агентов, которые могут быть достаточно токсичными. Одним из перспективных направлений инактивации нефти и нефтепродуктов *in situ* является применение метода биodeградации на основе бактерий-нефтедеструкторов, однако ни одни из бактерий не могут деградировать полностью все нефтяные фракции [2].

Поэтому, в настоящее время актуально повышение эффективности существующих способов детоксикации нефтезагрязненных сред с помощью применения современных биоконплексов, содержащих бактерии, разлагающие углеводороды нефти и сорбенты природного происхождения, способные не только связывать нефтезагрязнители в нетоксичные комплексы, но и оказывать стимулирующее действие как на внесенные микроорганизмы, так и на аборигенную микрофлору, что обеспечит высокий уровень ремедиации нефтезагрязненных экосистем.

При этом ведущим фактором, определяющим эффективность указанных процессов, являются гуминовые кислоты (ГК), представляющие собой активную матрицу органического вещества почв, торфов и природных вод. Сложность строения гуми-

новых кислот и наличие разнообразных функциональных групп определяет возможность их использования во многих отраслях промышленности, среди которых очень важно применение в качестве экологически чистых нефтедииспергентов.

Целью работы является изучение детоксицирующих свойств гуминовых кислот отдельно и совместно с бактериями-нефтедеструкторами *Pseudomonas fluorescens* 142NF в составе биоорганической композиции по отношению к отработанному синтетическому моторному маслу в почве.

В работе использовали гуминовые кислоты, выделенные из тростникового торфа Рязанской области водно-щелочной экстракцией [3]. Препараты гуминовых кислот использовали как индивидуально, так в составе композиций с микроорганизмами-нефтедеструкторами рода *Pseudomonas fluorescens* 142NF. Бактерии предоставлены лабораторией биологии плазмид Института биохимии и физиологии микроорганизмов имени Г.К. Скрябина РАН [4]. В качестве модельного токсиканта использовали отработанное синтетическое моторное масло марки Shell HELIX ULTRA 5W40. Биодegradация нефтепродуктов изучалась по снижению фитотоксического эффекта, оцениваемого по посевным качествам семян и морфометрическим характеристикам. Эксперимент проводили в следующих вариантах:

- Контроль (нефтезагрязненная почва)
- Контроль + гуминовые кислоты
- Контроль + *Pseudomonas fluorescens* 142NF
- Контроль + биоорганическая композиция (ГК (50 мг/л + *Pseudomonas fluorescens* 142NF (10^5 - 10^6 КОЕ) (3:1))

Через каждый 3-е суток почву обрабатывали дистиллированной водой (контроль), соответствующими растворами ГК/суспензией бактерий/ суспензией биоорганической композиции (10 мл). Длительность ремедиации составляла 14 суток. На 3-и и 5-е сутки определяли энергию прорастания и всхожесть семян тест-объекта, на 14-е сутки – морфометрические характеристики (длину корня, гипокотыля) и биомассу проростков кресс-салата.

При использовании биоорганической композиции на основе гуминовых кислот и бактерий-нефтедеструкторов наблюдается значительное снижение действия ОСММ: при низком содержании токсиканта фитотоксический эффект и по посевным качествам, и по морфометрическим характеристикам незначительный, следовательно, почва практически нефитотоксична, био-

органическая композиция стимулирует развитие семян, корней и наземной части тест-объекта (рис. 1).

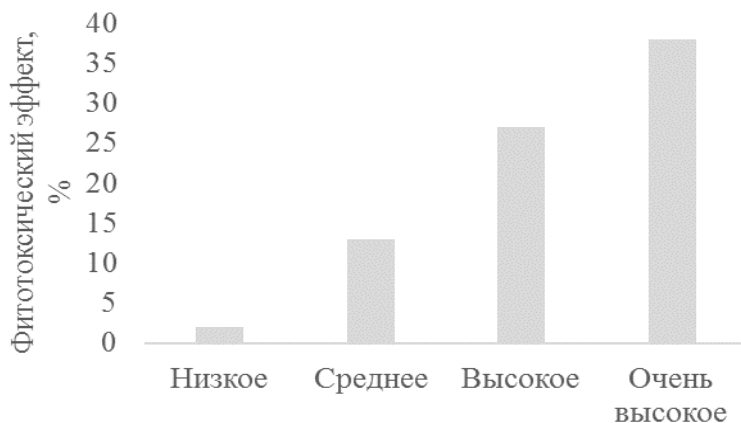


Рисунок 1. Фитотоксический эффект по посевным качествам семян кресс-салата в присутствии коммерческого препарата гуминовых кислот и микроорганизмов-нефтедеструкторов рода *Pseudomonas*

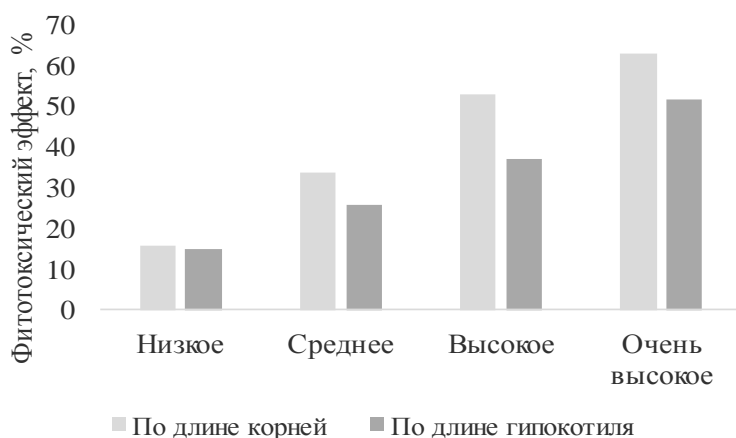


Рисунок 2. Фитотоксический эффект по морфометрическим характеристикам семян кресс-салата в присутствии коммерческого препарата гуминовых кислот и бактерий-нефтедеструкторов по длине корней и по длине гипокотыля

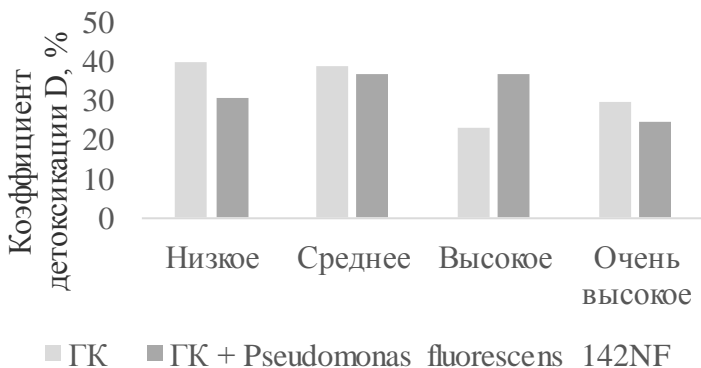


Рисунок 3. Детоксицирующий эффект гуминовых кислот и биокомпозиций на их основе при различных содержаниях отработанного синтетического моторного масла

Выявлено снижение токсического действия ОСММ при всех анализируемых содержаниях гуминовыми кислотами на тест-объект: коэффициенты детоксикации в зависимости содержания ОСММ составили 23-73%. Минимальный детоксицирующий эффект ГК наблюдается при загрязнении ОСММ: D 23-40%. Наиболее выраженное детоксицирующее действие ГК наблюдалось в случае загрязнении нефтью: D 55-73%. Авторы отмечают [5, 6], что одним из важнейших механизмов детоксикации компонентов нефти является образование микроорганизмами биосурфактантов или биоэмульгаторов. Они способствуют солюбилизации нефтяных углеводородов, образованию мелкодисперсной эмульсии, в результате чего облегчается контакт микробных клеток с гидрофобным субстратом. Данному факту способствуют уникальные биологические, физиологические и биохимические особенности этой группы микроорганизмов. Широкий спектр метаболических возможностей обуславливает способность *Pseudomonas* трансформировать и деградировать разнообразные по химической структуре углеводороды (алифатические, ароматические, нитроароматические, поли- и гетероциклические) и их производные (пестициды, полихлорированные бифенилы, фенолы, нитрилы). При внесении бактерий-деструкторов на загрязненный субстрат, они, используя гуминовые кислоты в качестве питательного субстрата, увеличивают свое количество и прикрепляются к пленке нефти на разделе фаз

нефть-почва и включаются в процесс биodeградации углеводов [7], что приводит к увеличению коэффициентов детоксикации в среднем на 15%.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме: «Иммобилизация тяжелых металлов продуктами взаимодействий слоистых силикатов с почвенным органическим веществом и микроорганизмами» (Средства дополнительного соглашения № 073-03-2023-030/2 от 14.02.2023 к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) 073-00030-23-02 от 13.02.23).

Литература

1. Радкевич М.В., Шпилова К.Б. Эколого-экономические проблемы использования отработанного моторного масла автомобилями // *Universum: технические науки*. 2019. №1(58).
2. Xu X., Liu W. et al. Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: a perspective analysis // *Frontiers in microbiology*. 2018. V. 9. P. 2885.
3. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885>
4. ГОСТ Р. 54221-2010 Гуминовые препараты из бурых и окисленных каменных углей. Методы испытания. М.: Стандартинформ. 2019. 12 с.
5. Патент РФ №2007125403/13, 05.07.2007.
6. Лыонг Т.М., Нечаева И.А., Понаморева О.Н. и др. Влияние пониженной температуры на биodeградацию гексадекана бактериями-нефтедеструкторами *Rhodococcus* sp. X5, продуцирующими гликолипидные биологические поверхностно-активные вещества // *Биотехнология*. 2017. №33(6). С. 49-56.
7. Лыонг Т.М., Нечаева И.А. Петриков К.В. и др. Структура и физико-химические свойства гликолипидных биосурфактантов, продуцируемых бактериями-нефтедеструкторами *Rhodococcus* sp. X5 // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2017. №2(21). С. 72-79.
8. Дмитриева Е.Д., Гриневиц В.И., Герцен М.М. Дeградация нефти и нефтепродуктов биокomпозициями на основе гуминовых кислот торфов и микроорганизмов-нефтедеструкторов // *Российский химический журнал*. 2022. №1. С. 42-56.

**ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ
ФЕРМЕНТОВ-ФАКТОРОВ ПАТОГЕННОСТИ
УГЛЕВОДОРОДООКИСЛЯЮЩИХ БАКТЕРИЙ,
ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ АНТРОПОГЕННО
ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ**

*Голубев Д.М., Венедюхина Е.П., Брызгун В.Е.,
Нестеркина Д.Д., Коробейникова А.С.*

*Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н. Г. Чернышевского,
биологический факультет, Саратов, Россия.
dimagolubev2018@yandex.ru*

Загрязнение почвы углеводородами - одна из наиболее серьезных экологических проблем нашего времени, ведь, накапливаясь в почвах, они способны нарушать круговороты веществ, что влечет за собой изменение физико-химических свойств и видового состава почвы. Углеводородоокисляющие микроорганизмы обладают субстратной избирательностью и способны разлагать углеводородные соединения, тем самым восстанавливая загрязненные грунты. Для разработки безопасных и эффективных методов биоремедиации почв необходимо учитывать физиологические особенности применяемых штаммов [1]. Именно поэтому существуют требования к потенциальным биодеструкторам: адаптация к условиям загрязнённых почв, устойчивость к токсичным веществам, активный рост, функционирование в широком диапазоне условий и самое критичное - отсутствие негативного воздействия на окружающую среду и живые организмы.

Целью работы являлось изучение активности ферментов-факторов патогенности углеводородоокисляющих бактерий, выделенных из антропогенно загрязнённых почв.

В работе были изучены углеводородоокисляющие бактерии, выделенные в ходе предыдущих исследований из почв г. Когалым в 2021-2022 гг.: *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Bacillus alcolophilus*, *Bacillus niacini*, *Bacillus psychrodurans*, *Bacillus halodurans*, *Bacillus funiculus* (рис. 1).



Рисунок 1. Рост углеводородокисляющих бактерий, выделенных из почв г. Когалым, на ГРМ-агаре

Город Когалым находится в Ханты-Мансийском автономном округе (ХМАО), Тюменской области и является основным нефтегазоносным районом России. Отбор почвенных проб проводили сотрудники Центра исследования керна и пластовых флюидов Филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «Когалым-НИПИнефть» в г. Тюмени. Отбор и подготовку проб осуществляли в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 [2]. Когалымский регион расположен на Западно-Сибирской равнине и представлен в основном зонами северной и средней тайги. Климат резкоконтинентальный, характеризующийся суровыми зимами и коротким прохладным летом. В связи с этим преобладает растительный покров типа сфагновых болот верховного типа и лесная растительность, представленная в основном сосновыми лесами. Почвы подзолистые и болотные, а по берегам рек пойменные. Подзолистые почвы характеризуются белесым оттенком, бедны гумусом и питательными веществами, а из-за повышенной влажности обладают кислым рН среды. Пойменные же почвы обладают мощным гумусовым слоем и рН, колеблющимся от 4

до 7. В 17 км северо-западнее г. Когалым находится Когалымское нефтяное месторождение, в пределах которого определены 7 нефтяных залежей, поэтому главной промышленной отраслью здесь является нефтедобыча, а также обработка и подготовка нефтяной продукции [3]. Выделение углеводородокисляющих бактерий проводили на синтетической среде М9 с добавлением 1 % нефти. Идентификацию выделенных микроорганизмов осуществляли на основании изучения фенотипических свойств по определителю бактерий Берджи [4].

Работа проводилась на базе кафедры микробиологии и физиологии растений СГУ имени Н.Г. Чернышевского. Нами была исследована активность следующих ферментов: гемолизина, плазмокоагулазы, фибринолизина, лецитиназы, ДНКазы и РНКазы. Представители данного ряда ферментов являются потенциальными факторами патогенности. Способность к разрушению клеток крови проверяли на кровяном агаре (стерильный ГРМ-агар + 5 % стерильной дефибринированной крови). Наличие фермента плазмокоагулазы определяли инкубированием суточных культур с плазмой крови, при положительном результате проводили дальнейшее инкубирование в течение нескольких дней для растворения образовавшегося сгустка. Для выявления лецитиназы проводили посев исследуемых штаммов на чашки Петри с желточным агаром, после чего их культивировали в термостате при температуре 28°C на протяжении 5 сут. Появление прозрачных ареолов вокруг колоний указывало на положительный результат. Чтобы исследовать возможность микроорганизмов гидролизировать нуклеиновые кислоты, сначала бактерии культивировали в среде с добавлением 10%-го раствора дезоксирибонуклеиновой кислоты и, затем, чтобы увидеть зоны лизиса для определения результатов, добавляли 1 Н раствора NaOH. Аналогичный опыт повторяли для изучения процесса гидролиза рибонуклеиновой кислоты [5].

При проведении теста на гемолиз, отрицательный результат показали все штаммы, а это означает, что исследуемые бактерии не обладают гемолизином. Ферментов, способных разрушать плазму крови, образуя сгусток, также обнаружить не удалось, что следует из отрицательного теста на фибринолизин. К гидролизу лецитина способны 50% исследуемых штаммов, что может свидетельствовать о наличии у *B. alcolophilus*, *B. niacini* и *B. funiculus* фермента лецитиназы. Ферментами, разрушающими

дезокси- и рибонуклеиновые кислоты, обладают также 50 % штаммов, все из них являются представителями рода *Bacillus* (таблица 1).

Таблица 1. Присутствие ферментов у углеводородоокисляющих бактерий

Виды бактерий	Ферменты				
	гемолизин	плазмокоагулаза/фибринолизин	лецитиназа	ДНК-аза	РНК-аза
<i>C. flaccumfaciens</i>	-	-	+	-	-
<i>B. alcalophilus</i>	-	-	-	+	+
<i>B. funiculus</i>	-	-	-	+	+
<i>B. halodurans</i>	-	-	-	+	+
<i>B. niacini</i>	-	-	+	-	-
<i>B. psychrodurans</i>	-	-	+	-	-

Данные результаты позволяют предположить, что некоторые из исследуемых штаммов обладают патогенными свойствами по отношению к животным и могут представлять опасность при внесении их в качестве биопрепарата в почву. Однако стоит учитывать, что эффективность и безопасность биологических препаратов может сильно зависеть от факторов окружающей среды [6].

Литература

1. Усманов, А.С., Сафина Л.М. Загрязнение почвы тяжелыми металлами и углеводородами: экологические риски и методы биоремедиации // Биохимия. 2018, Т. 83, № 9, с. 1259-1278.
2. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: Межгосударственные стандарты. - М.: Стандартинформ, 2008. - 8 с.
3. <https://gorodarus.ru/kogalym.html> (Города и регионы России 2023).
4. Хоулт Дж. Определитель бактерий Берджи / Под проф. ред. Дж. Хоулта. М.: Мир. 1997.

5. Нетрусов А.И. Практикум по микробиологии: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Под проф. ред. А. И. Нетрусов. М.: Академия. 2005.
6. Сундет Т.Р. Влияние биопрепаратов на здоровье почвы и сельскохозяйственную продукцию // Почвоведение и агрохимия. 2023, №1, с. 86-104.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

*Грицай М.А.¹, Бауэр Т.В.², Поляков В.А.¹, Бутова В.В.¹,
Рудь П.А.¹, Минкина Т.М.²*

*¹Южный федеральный университет, Международный
исследовательский институт интеллектуальных материалов,
Ростов-на-Дону, Россия*

*^{2,1}Южный федеральный университет, Академия биологии и
биотехнологии им. Д.И. Иванковского Ростов-на-Дону, Россия
gritsai@sfnu.ru*

Загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) является глобальной проблемой для здоровья человека и производства безопасных продуктов питания [1]. Металлы не подвержены биодеградации с течением времени, за счет чего они способны накапливаться в объектах окружающей среды и нести опасность для разных трофических звеньев [2].

Одним из основных источников загрязнения почв ТМ является промышленная деятельность, включая горнодобывающую промышленность, химическое производство и мусоросжигательные заводы. Неконтролируемое использование удобрений и пестицидов в сельском хозяйстве также способствует накоплению ТМ в почве. Кроме того, выбросы автотранспорта могут оседать на почву и приводить к ее загрязнению.

За последние годы для очистки и восстановления загрязненных ТМ почв были разработаны различные *in situ* и *ex situ* технологии, получившие широкое распространение. Отдельного внимания заслуживают подходы, связанные с внесением различных сорбентов [3]. В частности, для иммобилизации ТМ в почве широко используются углеродистые сорбенты (например, активированный уголь и биочар), к которым относятся продукты термической обработки материалов растительного и животного происхождения, а также некоторые промышленные отходы. Благодаря большой площади удельной поверхности и высокой пористости, их внесение в почву снижает биодоступность загрязняющих веществ, а также токсичность и биоаккумуляцию живыми организмами [4].

В последнее время для повышения эффективности и устойчивости процесса ремедиации почв разрабатываются новые типы сорбентов, которые включают наночастицы и функциональные наноматериалы, например, металл-органические координационные полимеры или каркасы (МОК) [5]. За счет высоких значений активной поверхности наночастицы обладают способностью связывать токсичные металлы и эффективно удалять их из почвы. Наноконпозиты (НК) имеют модифицированную поверхность, оптимизированную для взаимодействия с загрязняющими веществами и улучшения их удерживания.

В рамках данного исследования разработана уникальная технология получения инновационного наноконпозита на основе биочара и наночастиц МОК для очистки почв с высоким и экстремально высоким уровнем загрязнения ТМ (рис. 1).

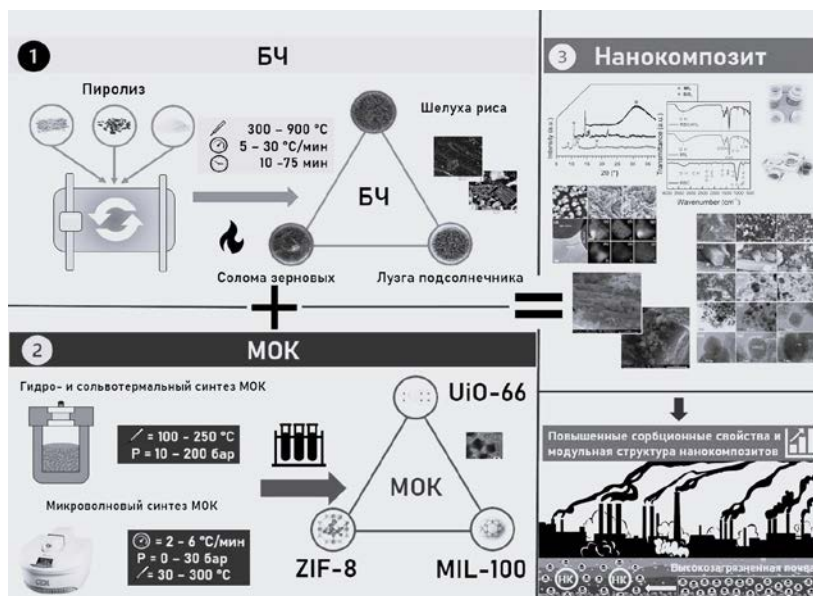


Рисунок 1. Синтез композитных материалов на основе биочаров (БЧ) и металл-органических каркасов (МОК) для внесения в почву с высоким и экстремально высоким уровнем загрязнения

При использовании лабораторной пиролизной установки получены экспериментальные образцы биочара с заданными функциональными параметрами из многотоннажных отходов

растениеводства: шелухи риса, лузги семян подсолнечника и соломы пшеницы. Выполнена отработка температурных режимов (300, 500, 700, 900°C), скоростей нагрева (5, 10, 15, 20, 30°C/мин) и длительности пиролиза (10, 25, 45, 60, 75 мин) для формирования требуемых характеристик биочара. Установлена оптимальная температура и время пиролиза, при которой поры стабильны, не образуются трещины и разрастание пор.

Синтезированы МОК в виде наночастиц: UiO-66, UiO-66 BA, UiO-66-NH₂, UiO-66-NH₂ BA, MIL-100(Fe), MOF-801 и MOF-801 FA. Для получения всех типов МОК проведена оптимизация условий синтеза методом введения модуляторов или изменения условий протекания реакций. Все полученные образцы всесторонне охарактеризованы методами XRD, ИК-спектроскопии, ТГА, электронной микроскопии и низкотемпературной адсорбции азота. Для всех синтезированных образцов проведено исследование процесса сорбции ионов Cd²⁺ из растворов азотнокислой соли различных концентраций. Сохранение кристаллической структуры МОК отслеживалось по данным XRD, сорбционная емкость материала – методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

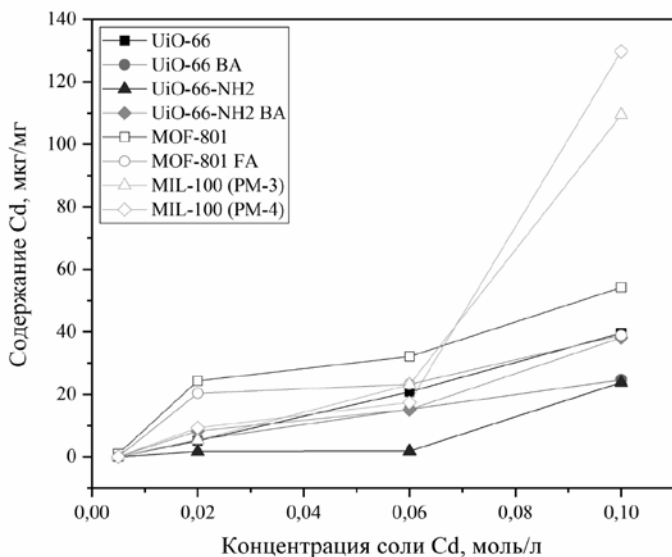


Рисунок 2. График сорбционной емкости образцов МОК к Cd

Наибольшую сорбционную емкость по отношению к Cd проявил образец MIL-100(Fe), что объясняется его наибольшей удельной площадью поверхности (1930 м²/г) (рис. 2), а также наибольшим размером пор 25 и 29 Å [6].

Данный образец МОК был выбран для создания нанокомпозитов с биочарами из соломы пшеницы, шелухи риса, лузги семян подсолнечника. Каждый из биочаров был добавлен в ходе синтеза MIL-100(Fe). В результате получены три образца нанокомпозитов. Сканирующая электронная микроскопия с элементным картированием (SEM-EDX) показала, что нанокомпозит на основе биочара из соломы пшеницы характеризуется относительно равномерным распределением MIL-100(Fe) по углеродистой поверхности и является наиболее перспективным для использования в целях ремедиации почв.

Таким образом, разработана технология получения биочара с заданными параметрами из отходов растениеводства юга России: шелухи риса, лузги семян подсолнечника и соломы пшеницы. Для формирования требуемых характеристик пористости сорбента выполнена отработка температурных режимов (300–900°C), скоростей нагрева (5–30°C/мин) и длительности пиролиза (10–75 мин). Для создания нанокомпозитов на основе биочара синтезированы наночастицы МОК семейства UiO-66, MOF-801, ZIF-8, MIL-100(Fe). Показано, что наиболее перспективным для использования в целях ремедиации почв оказался нанокомпозит на основе биочара из соломы пшеницы и МОК MIL-100(Fe).

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22–76–10054) в Южном федеральном университете.

Литература

1. Liu L., Li W., Song W., Guo M. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 633. P. 206–219.
2. Li C, Zhou K, Qin W, Tian C, Qi M, Yan X, et al. A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques. Soil and Sediment Contamination: An International Journal. 2019; 28(4):380-94.

3. Weng L, Temminghoff EJM, Van Riemsdijk WH. Contribution of Individual Sorbents to the Control of Heavy Metal Activity in Sandy Soil. *Environmental Science & Technology*. 2001; 35(22): 4436-43.
4. Ahmad M, Rajapaksha AU, Lim JE, Zhang M, Bolan N, Mohan D, et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*. 2014;99:19-33.
5. Taghizadeh M, Asgharinezhad AA, Pooladi M, Barzin M, Abbaszadeh A, Tadjarodi A. A novel magnetic metal organic framework nanocomposite for extraction and preconcentration of heavy metal ions, and its optimization via experimental design methodology. *Microchimica Acta*. 2013;180(11):1073-84.
6. Horcajada P, Surblé S, Serre C, Hong D-Y, Seo Y-K, Chang J-S, et al. Synthesis and catalytic properties of MIL-100(Fe), an iron(III) carboxylate with large pores. *Chemical Communications*. 2007(27):2820-2.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ ГУМИНОВЫМИ КИСЛОТАМИ НА НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИСКУССТВЕННЫХ ПОЧВ

Грузденко Д.А.¹, Якименко О. С.¹, Панова И.Г.²

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

¹факультет почвоведения, Москва, Россия

²Химический факультет

dmitryigruzdenko99@gmail.com

Деградация земель и все связанные с этим процессы охватывают весь мир и являются глобальными социальными, экономическими и экологическими проблемами современности, которые связаны как с изменением климата, так и с антропогенной деятельностью человека [3]. Чаще всего деградация почв происходит из-за разрушения верхних горизонтов почв, которые имеют наибольшую ценность в силу своей плодородности, в результате водной и ветровой эрозии [8].

Одним из подходов решения данной проблемы является использование стабилизирующих рецептур на основе полимеров для получения защитных составов на поверхности верхних горизонтов почв. Этот метод представляет особый интерес за счет коммерческой доступности исходных компонентов, входящих в состав стабилизирующих рецептур.

Для стабилизации структуры почвы были предложены интер-полиэлектrolитные комплексы (ИПЭК), продукты взаимодействия двух противоположно заряженных полиэлектролитов (ПЭ) [1-2, 4-6]. Способность ИПЕК улучшать гидрофизические свойства почвы, предотвращать эрозию почвы и действовать в качестве кондиционеров почвы была изучена в наших предыдущих работах [7]. Эффективность ИПЕК зависела как от химического состава ИПЕК, так и от свойств почвы. Использование гуминовых веществ в качестве полианионной части ИПЭК является перспективным подходом к разработке экологически чистых и эффективных рецептур [1, 6, 7].

В этом исследовании мы использовали два ИПЭК: положительно и отрицательно заряженный. Оба были получены из коммерческих полимеров с избытком либо поликатиона, либо полианиона: катионного поли (диаллилдиметиламмонийхлорида) (ПДАДМАХ) и анионного лигногумата биополимера (ЛГ), стимулятора роста растений на основе гуминовых веществ. Целью исследования была оценка влияния трех ПЭ (ЛГ, ИПЭК+ и ИПЭК-) на мобилизацию/иммобилизацию Cd и Pb в почве, искусственно загрязненной этими металлами, а также на агрегатный состав почвы и рост растений в модельном эксперименте.

Эксперименты проводились на делянках размером 0,5х0,5 кв. м с использованием искусственной почвы, состоящей из песка (48%), глины (48%) и торфа (4%). Почвы сначала обрабатывали 2% растворами ПЭ (1,5 л на делянку), а затем вносили CdCl₂ и Pb(CH₃COO)₂ в дозах, равных 3 ориентировочно допустимым концентрациям (ОДК), и высевали *Festuca pratensis*. Через 2 месяца определяли биомассу растений, агрегатный состав почвы методом сухого и мокрого просеивания и содержание подвижных форм Cd и Pb в аммонийно-ацетатном буфере (pH 4,8) методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре Analytik Jena ContrAA 800 F.

Как ИПЭК, так и ЛГ снижали содержание подвижных форм кадмия (рис. 1) и свинца (рис. 2) в почве по сравнению с контролем с добавлением тяжелых металлов (ТМ). Наибольший детоксицирующий эффект наблюдался у отрицательно заряженного ИПЭК с уменьшением содержания подвижных форм Cd и Pb на 34-35%. Положительно заряженный ИПЭК и ЛГ также продемонстрировали способность к детоксикации: содержание кадмия и свинца снизилось на 21% и 24-25% соответственно.

Влияние ПЭ на агрегатный состав почвы по данным сухого и мокрого просеивания сравнивали с уже ранее полученными результатами аналогичного эксперимента с урбаноземом [7]. Это было сделано для того, чтобы оценить влияние полимерных рецептур на отличающихся друг от друга почвах соотношением структурных агрегатов.

В случае с почвогрунтом исходная структура почвы содержит более высокую долю агрономически ценных агрегатов, в отличие от урбанозема, который содержал высокую долю фракции больше 10 мм.

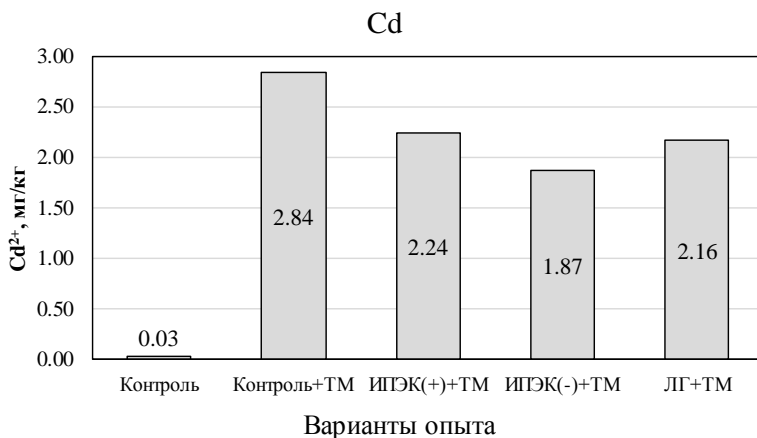


Рисунок 1. Среднее содержание подвижных форм кадмия в вариантах опыта с почвогрунтом (среднее и станд. отклонение)

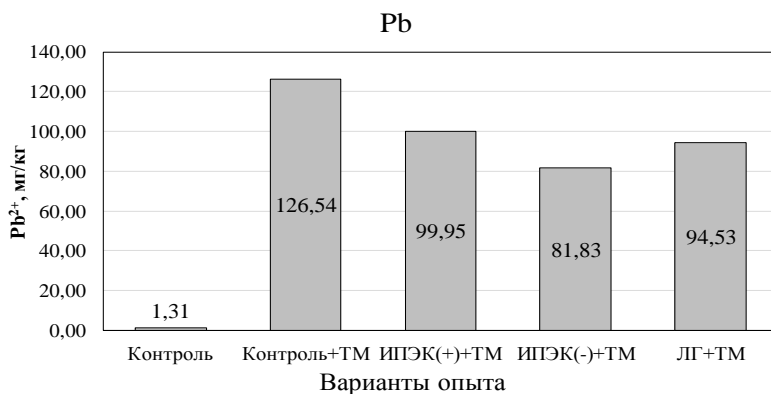


Рисунок 2. Среднее содержание подвижных форм свинца в вариантах опыта с почвогрунтом (среднее и станд. отклонение)

Более выраженное влияние на агрегатный состав было выявлено в вариантах с урбаноземом. При обработке раствором поликациона происходит диспергация глыбистой фракции, но при этом увеличивается доля агрегатов меньше 0,25 мм. Приме-

нение лигногумата напротив приводит к увеличению доли глыбистой фракции, снижая долю агрономически ценных агрегатов в составе исследуемых почв. Обработка положительно заряженным ИПЭК увеличивает долю агрономически ценных агрегатов в варианте с урбаноземом и снижает данный показатель при обработке почвогрунта. Это связано с диспергацией крупных агрегатов и незначительным увеличением доли агрегатов меньше 0,25 мм. В случае с урбаноземом положительный эффект достигается за счет снижения доли доминирующей глыбистой фракции, а варианте с почвогрунтом, где крупная фракция практически отсутствует увеличение доли мелких агрегатов более выражено и это приводит снижению доли агрономически ценных агрегатов.

Отрицательно заряженный ИПЭК практически не приводит к изменению состава структурных агрегатов при обработке почвогрунта.

В фитотестах все полимеры не оказали существенного влияния на параметры роста растений.

Результаты работы показывают, что отрицательно заряженные ИПЭК и ЛГ обладают потенциалом для снижения содержания подвижных видов тяжелых металлов и, таким образом, для смягчения их токсичности для растений, но не оказали существенного влияния на структуру почвы для исследуемых почв. Положительно заряженный ИПЭК разрушает крупные почвенные агрегаты и может улучшить структуру почвы в случае комковатых почв. В целом, ИПЭК на основе гуминовых кислот можно рассматривать как инструмент для создания продуктивных искусственных почв.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-13.

Литература

1. Панова И.Г., Ильясов Л.О., Ярославов А.А. Поликомплексные рецептуры для защиты почв от деградации // Высокомолекулярные соединения. 2021. Т. 63. № 2. Сер. С. С. 232-244.
2. Панова И.Г., Хайдапова Д.Д., Ильясов Л.О., Киушов И.И., Умарова А.Б., Сыбачин А.В., Ярославов А.А. Полиэлектrolитные ком-

- плексы гуматов калия и поли (диаллилдиметиламмоний хлорида) для закрепления песчаного грунта //Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2019. – Т. 61. – №. 6. – С. 411-416.
3. Lal R. Soil degradation by erosion //Land degradation & development. – 2001. – Т. 12. – №. 6. – С. 519-539.
 4. Panova I., Drobyazko A., Spiridonov V., Sybachin A., Kydralievа K., Jorobekova S., Yaroslavov A. Humics-based interpolyelectrolyte complexes for antierosion protection of soil: Model investigation //Land Degradation & Development. – 2019. – Т. 30. – №. 3. – С. 337-347.
 5. Panova I.G., Demidov V.V., Shulga P.S., Ilyasov L.O., Butilkina M.A., Yaroslavov A.A. Interpolyelectrolyte complexes as effective structure-forming agents for Chernozem soil // Land Degradation & Development. 2021. V. 32. P. 1022-1033.
 6. Panova I.G., Khaydapova D.D., Ilyasov L.O., Umarova A.B., Yaroslavov A.A. Polyelectrolyte complexes based on natural macromolecules for chemical sand/soil stabilization // Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects. 2020. 590
 7. Yakimenko O. S. et al. Polyelectrolytes for the construction of artificial soils // Polymer Science, Series C. – 2021. – Т. 63. – №. 2. – С. 249-255.
 8. Zezin A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B., Zansokhova M.F., Sybachin A.V., Yaroslavov A.A. Zezin A. B. et al. Polymeric stabilizers for protection of soil and ground against wind and water erosion // Advances in colloid and interface science. – 2015. – Т. 226. – С. 17-23.

**ГЕТИТ, ИНТЕРКАЛИРОВАННЫЙ В
АКТИВИРОВАННЫЙ УГОЛЬ, УЛУЧШАЕТ РОСТ
SINAPIS ALBA В ПРИСУТСТВИИ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ**

***Дзеранов А.А.^{1,2,3}, Жаркынбаева Р.А.⁴, Панкратов Д.А.⁵,
Саман Д.¹, Бондаренко Л.С.¹, Терехова В.А.⁵, Маметова А.С.⁴
и Кыдралиева К.А.¹***

¹*Московский авиационный институт (Национальный
исследовательский университет), Москва, Россия*

²*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН, Черноголовка, Московская область, Россия*

³*НИИ скорой помощи имени Н.В. Склифосовского, Москва, Россия*

⁴*Ошский государственный университет, Кыргызская Республика*

⁵*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
Москва 119991, Россия*

arturdzeranov99@gmail.com

Железо является незаменимым микроэлементом, который участвует в важных физиологических процессах в растениях. Для коррекции дефицита железа сельскохозяйственных культур, выращиваемых на известковых почвах [1], иногда применяют растворимые соли железа, которые малоэффективны в малых дозах и не оказывают длительного действия, так как ионы железа подвергаются гидролизу и удаляются из растворимой фазы почвы за счет осаждения гидроксидов. В других случаях применяют более эффективные хелаты железа с синтетическими органическими хелаторами [2]. Но, при регулярном внесении в почву, последние накапливаются [3], попадают в естественные водоемы и, обладая высокой комплексообразующей способностью, способствуют повышению подвижности и миграции тяжелых металлов и радионуклидов в окружающей среде. Биологически доступные формы железа, стабилизированные гуминовыми веществами, являются экологически безопасным средством, так как гуминовые вещества выполняют целый комплекс важных биосферных функций: обладают способностью образовывать устойчивые комплексы с ионами металлов [4], стабилизировать почвенные коллоиды, содержащие наночастицы оксидов [5], а также оказывать защитное действие на организмы в условиях стресса [6, 7].

Наиболее доступной формой железа являются оксигидроксиды железа, среди которых гетит является наиболее распространенным в почвах и термодинамически стабильным [8]. В настоящем исследовании представлены данные по синтезу и характеристике физико-химических и биологических свойств, модифицированных гуминовыми кислотами (ГК) наночастиц гетита, интеркалированных в матрицу активированного угля (α -FeOОН-АУ), с целью пролонгированного действия препаратов.

Наночастицы (НЧ) гетита были получены восстановлением ионов железа $3+$ в щелочной среде и последующей инкубацией с активированным углем (АУ) и гуминовыми кислотами разной концентрации от 1 до 10 масс.%. Синтезированные НЧ были охарактеризованы методами рентгеновской дифракции, мессбауэровской спектроскопии, низкотемпературной адсорбции-десорбции N_2 по методу Брунауэра-Эммета-Теллера, дзета-потенциалу, высвобождению ионов железа и фитотестированию с высшими растениями *Sinapis alba*.

При исследовании кристаллической структуры полученных образцов методом рентгенофазового анализа (РФА) обнаружено высокое соотношение шум/сигнал из-за влияния матрицы активированного угля. Основной фазой синтезированных и модифицированных гуминовыми кислотами НЧ, определённой методом Ритвельда, являлся гетит α -FeOОН с размерами областей когерентного рассеяния 21 и 37 нм соответственно.

Удовлетворительное математическое описание профиля мессбауэровских спектров при 296 К достигалось при использовании суперпозиции двух симметричных дублетов и двух вложенных секстетов. Наиболее интенсивный секстет с минимальной величиной сверхтонкого магнитного поля, соответствует фазе гетита, менее интенсивный секстет с сильным сверхтонким магнитным полем описывает состояние атомов железа в нестехиометрическом магнетите. По интенсивностям соответствующих секстетов соотношение гетита к магнетиту в образцах можно оценить в 4:1.

Интеркаляция α -FeOОН в матрицу АУ увеличила удельную площадь поверхности, что способствует сорбции ГК. Модификация гуминовыми кислотами привела к постепенному снижению удельной площади поверхности с 328 до 210 м²/г и объема с 0,32 до 0,23 см³/г.

Оценка межфазных взаимодействий и устойчивости частиц проводилась методом электрофоретического рассеивания света (рис. 1). В присутствии ГК наблюдается существенный сдвиг изоэлектрической точки рН с рН 5,3 до рН 3,5, 4,0 и 3,2 для 1, 5 и 10 мас.% α -FeOОН-АУ-ГК соответственно. Добавление небольших количеств ГК (5 мас.%) приводило к более существенному сдвигу ζ -потенциала по сравнению с более высокой концентрацией ГК. Снижение отрицательных зарядов на поверхности частиц гетита в присутствии 10 мас. % ГК-полиэлектролитов может быть вызвано конформационной структурой полиэлектролитов, приводящей к меньшему количеству COOH/ОН групп на поверхности ГК.

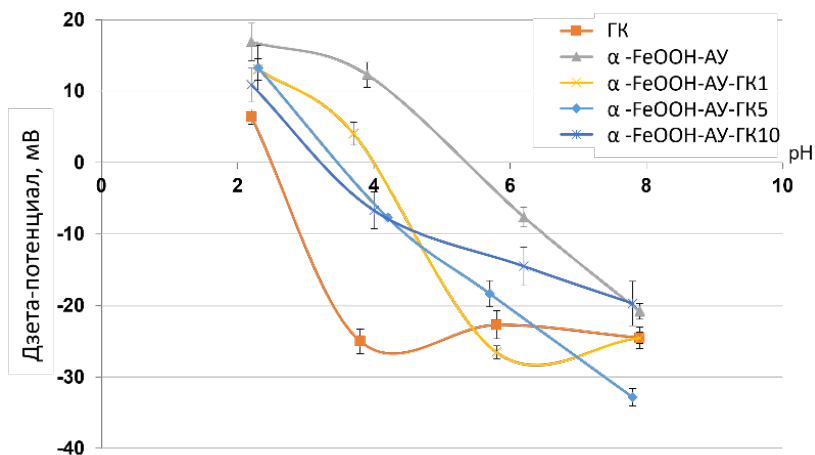


Рисунок 1. Зависимость дзета-потенциала наночастиц от рН

Фитотестирование препаратов проводили по отношению к семенам белой горчицы *S. alba* по зависимости доза-эффект водных суспензий наночастиц железа в 96-часовом тесте по длине корней растения (рис. 2), согласно ISO 18763: 2016 и ФР Росреестра 1.31.2012.11560. Оценка биологической активности показала, что стимулирование роста корня растений наблюдается в следующем ряду: α -FeOОН-АУ < ГК < α -FeOОН-АУ-ГК10 < α -FeOОН-АУ-ГК1. Предполагаемым механизмом увеличения стимуляции роста корня гетит-содержащими образцами по сравнению с ГК является высвобождение ионов железа из нанокompозита.

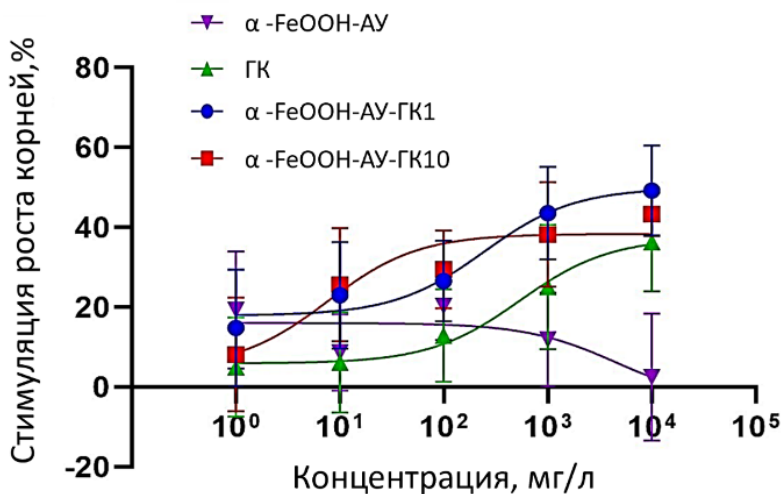


Рисунок 2. Влияние дозозависимого-эффекта водных суспензий наночастиц железа на рост корней высших растений *S. alba*

С целью оценки механизма влияния Fe^{2+} и Fe^{3+} на стимуляцию роста растений проводилось исследование по определению кинетики и концентрации высвобождаемых из образцов ионов железа с использованием спектроскопии в УФ и видимой области. Кинетика высвобождения общей концентрации ионов в обоих случаях различна. По сравнению с α -FeOOH-AU высвобождение Fe^{3+} и Fe^{2+} из α -FeOOH-AU-ГК являлось более стабильным и зависело от времени. Длительная стимуляция роста растений в присутствии ГК может быть объяснена образованием биодоступных (растворимых) гуминовых комплексов как Fe^{3+} , так и Fe^{2+} . Таким образом, возможность использования Fe-гуминовых комплексов различного состава и растворимости может рассматриваться как экологически чистый инструмент железосодержащих препаратов для сельскохозяйственных культур.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-23-00621.

Литература

1. Marschner P., Rengel, Z. Chapter 12: Nutrient availability in soils. In Marschner's mineral nutrition in higher plants // Academic Press: London, UK, 2012, p. 315–330.
2. List of authorised organic chelating agents for micro-nutrients pursuant to Annex I, paragraph E.3.1. of Regulation (EC) N° 2003/2003 relating to fertilizers. 2003
3. Inaba S., Takenaka C. Effects of dissolved organic matter on toxicity and bioavailability of copper for lettuce sprouts // Environ. Int. 2005, №31, p. 603–608.
4. Senesi N., Calderoni G. Structural and chemical characterization of copper, iron and manganese complexes formed by paleosol humic acids // Org. Geochem. 1988, №13, p. 1145–1152.
5. Illes E., Tombacz E. The effect of humic acid adsorption on pH-dependent surface charging and aggregation of magnetite nanoparticles // J Colloid Interface Sci. 2006, №295, p. 115–123.
6. Cesco S., Roemheld V., Varanini Z., Pinton R. Solubilization of iron by water-extractable humic substances // J. Plant. Nutr. Soil Sci. 2000, №163, p. 285–290.
7. Kulikova N.A., Perminova I.V., Badun G.A., Chernysheva M.G., Koroleva O.V., Tsvetkova E.A. Estimation of uptake of humic substances from different sources by Escherichia coli cells under optimum and salt stress conditions by use of tritium-labeled humic materials // Appl. Environ. Microbiol. 2010, №76, p. 6223–6230.
8. Zhang S., Du Q., Sun Y., Song J., Yang F., Tsang D.C.W. Fabrication of L-cysteine stabilized α -FeOOH nanocomposite on porous hydrophilic biochar as an effective adsorbent for Pb²⁺ removal // Sci. Total Environ. 2020, 137415.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕННОГО КОМПЛЕКСНОГО ТОРФЯНОГО СОРБЕНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОЧВЫ ОТ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Запорожская А.А.

*Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина», Москва, Россия
wlasjashka@mail.ru*

В России существует большое количество разливов нефти и для ликвидаций последствий требуется подобрать эффективный и экономически целесообразный метод очистки [1]. Поэтому на рынке существует разные типы сорбентов и на сегодняшний момент, предпочтительными являются сорбенты из природных материалов. Так как они не токсичные, доступные и дешевые. Но по сравнению с синтетическими аналогами сорбенты на основе природных материалов имеют низкую нефтеемкость [2].

Разработка способов модификации сорбентов на основе природных материалов с целью увеличения показателя нефтеемкости является актуальной задачей.

В работе были исследованы торфяные материалы с целью увеличения эффективности поглощения нефти. В эксперименте в качестве объектов исследования – базовых природных материалов – были использованы торфа нескольких месторождений России (верховой и низинный торф из Московской области, верховой и низинный торф из Ленинградской области, верховой торф из Рязанской области и верховой торф из Владимирской области). Анализ исходной величины нефтеемкости [3] показал, что самое большое количество нефти поглощает верховой торф из Ленинградской области (3,64 г/г).

Для увеличения нефтеемкости верховой торф из Ленинградской области был обработан термическим и химическим способами. При термической обработке в течение нескольких часов при 105°C торфяной материал терял влагу, что способствовало повышению гидрофобности поверхности; нефтеемкость незначительно увеличивалась (3,72 г/г).

Затем торфяные образцы подвергались обработке химическими реагентами (метанолом, соляной, фосфорной, винной, лимонной кислотами). Лучший результат по нефтеемкости получился у торфяного образца, обработанного соляной кислотой (3,95 г/г). Обработка торфа соляной кислотой позволила удалить карбонатные отложения и, тем самым, увеличить емкость порового пространства.

Заключительный этап комплексной обработки торфяного материала состоял в иммобилизации на поверхности порового пространства углеводородокисляющих микроорганизмов (*Rhodococcus* и *Pseudomonas*).

Для определения качества очистки нефтезагрязненной среды с помощью комплексного торфяного сорбента были подготовлены модельные образцы почвы с разной концентрацией нефти (3%,5%,10%). В модельные образцы добавили комплексный торфяной сорбент (КТС) и анализировали в течение трех месяцев на содержание нефти (рис. 1) [4] и влияние на биологические объекты - определение фитотоксичности [5,6] (рис. 2, 3) и токсичности (таб. 1, 2) [7,8].

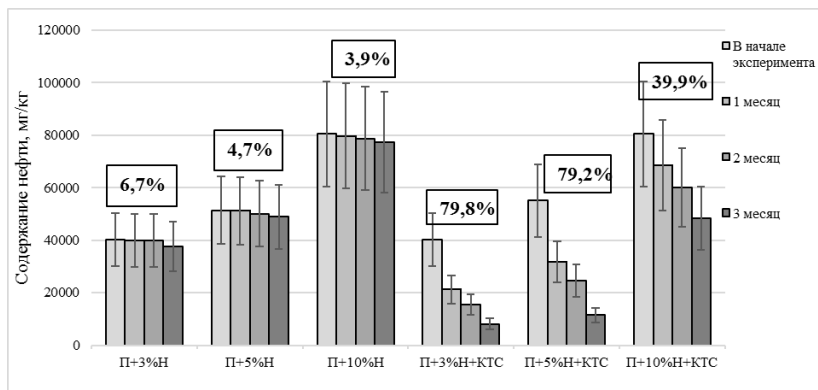


Рисунок 1. Изменение содержания нефти в модельных образцах за три месяца

Анализ на содержание нефти в почве за три месяца показал, что при содержании нефти 3% очистка составляет 6,7%, а с добавлением комплексного торфяного сорбента 79,8%. Положительный результат был получен при содержании в почве 5% нефти, восстановление почвы комплексным торфяным сорбентом

за три месяца составило 79,2%. Восстановление почвы при загрязнении 10% нефти составило 39,9% за три месяца. При 10% загрязнении требуется увеличить количество микроорганизмов в торфяном сорбенте, либо увеличить время эксперимента.

Для дальнейшего исследования влияния способности очистки комплексным торфяным сорбентом был поставлен эксперимент на двух растениях – однодольных и двудольных. Результаты анализа на фитотоксичность модельных образцов почвы за три месяца представлены на рисунках 2, 3.

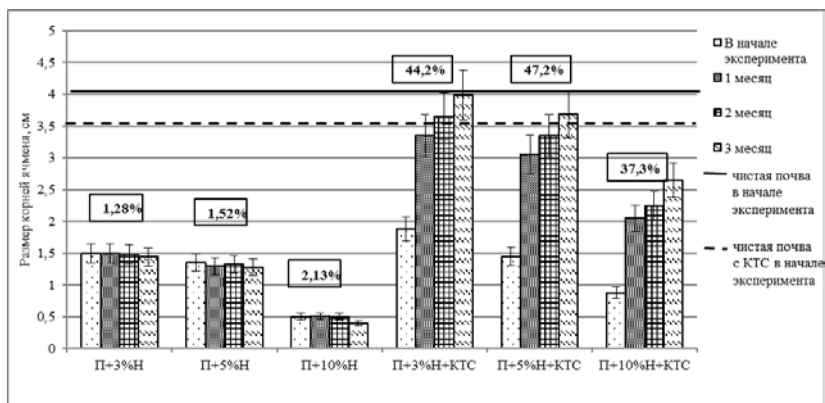


Рисунок 2. Изменение длины корня ячменя в течение трех месяцев в модельных образцах

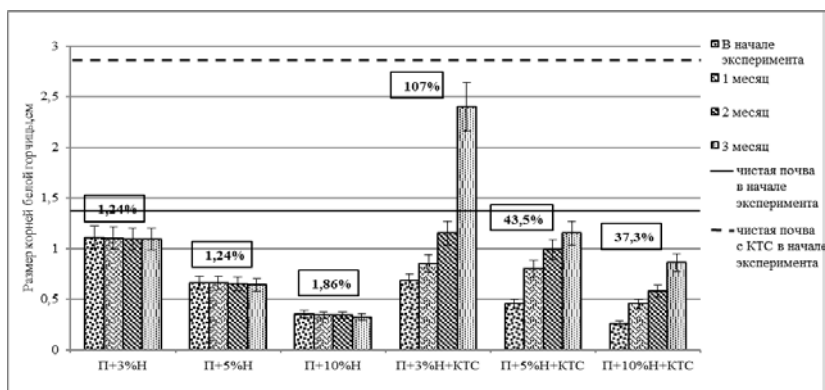


Рисунок 3. Изменение длины корня белой горчицы в течение трех месяцев в модельных образцах

В результате анализа было выявлено, что комплексный торфяной сорбент с углеродооксилирующими микроорганизмами повлиял не только на очистку, но и стимулировал рост корней. Увеличение длины корня ячменя (однодольное растение) при 3%-ном загрязнении нефтью и с добавлением комплексного сорбента составило 44,2% за три месяца по сравнению с длиной корня ячменя, пророщенном в почве без добавления комплексного сорбента, где произошло угнетение длины корня ячменя на 1,28%. Похожий результат получен при 5%-ном загрязнении нефтью, с добавлением комплексного торфяного сорбента увеличение длины корня ячменя составило 47,2% за три месяца, а без добавления комплексного торфяного сорбента произошло угнетение длины корня ячменя на 1,58%. При 10%-ном загрязнении нефтью увеличение длины корня ячменя при проращивании в почве с добавлением комплексного торфяного сорбента составило 37,3% за 3 месяца, а угнетение длины корня ячменя при проращивании в почве без добавления комплексного торфяного сорбента составило 1,58% (рис. 2).

Увеличение длины корня белой горчицы (двудольное растение) при 3%-ном загрязнении нефтью и с добавлением комплексного сорбента составило 107% за три месяца по сравнению с длиной корня белой горчицы, пророщенном в почве без добавления комплексного сорбента, где произошло угнетение длины корня белой горчицы на 1,24%. При 5%-ном загрязнении нефтью, с добавлением комплексного торфяного сорбента увеличение длины корня белой горчицы составило 43,5% за три месяца, а без добавления комплексного торфяного сорбента произошло угнетение длины корня белой горчицы на 1,24%. При 10%-ном загрязнении нефтью увеличение длины корня белой горчицы при проращивании в почве с добавлением комплексного торфяного сорбента составило 37,3% за 3 месяца, а угнетение длины корня белой горчицы при проращивании в почве без добавления комплексного торфяного сорбента составило 1,86% (рис. 3).

На рисунке 2 и 3 видно, что комплексный торфяной сорбент хорошо справляется с загрязнением нефти 3% и 5%. При загрязнении 10% нефтью требуется больше времени или внесение стимулирующих добавок.

Также для оценки влияния нефтяного загрязнения и способности очистки модельных образцов почвы комплексным тор-

фьяным сорбентом был поставлен эксперимент на токсичность на двух тест-объектах: хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) и инфузории (*Paramecium caudatum* Ehrenberg). Результаты представлены в таблице 2, 3.

Таблица 2. Результаты анализа модельных образцов на тест-объекте хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) за три месяца

Название образца	В начале эксперимента			3 месяца		
	Индекс токсичности, %	Величина токсической кратности разбавления ТКР	Оценка тестируемой пробы (оказывает токсическое действие/ не оказывает)	Индекс токсичности, %	Величина токсической кратности разбавления ТКР	Оценка тестируемой пробы (оказывает токсическое действие/ не оказывает)
П	0,2	без	не оказывает	1,1	без	не оказывает
П+3%Н	50	10	оказывает	44,1	10	оказывает
П+5%Н	99	10	оказывает	79,4	10	оказывает
П+10%Н	100	100	оказывает	99,9	100	оказывает
П+КТС	6,8	без	не оказывает	5,5	без	не оказывает
П+3%Н+КТС	51,6	10	оказывает	6,3	без	не оказывает
П+5%Н+КТС	95	10	оказывает	19,6	без	не оказывает
П+10%Н+КТС	100	100	оказывает	83,3	100	оказывает

Результаты анализа токсичности на тест-объектах хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) и инфузории (*Paramecium caudatum* Ehrenberg) аналогичны. В таблице 2 и 3 видно, что результаты токсичности на втором месяце изменились: модельный образец почвы с 3%-ным нефтезагрязнением и с углеродокисляющими микроорганизмами не оказывает токсичное воздействие на биологические тест-объекты. Результат токсичности модельного образца почвы с 5%-ным нефтезагрязнением и с углеродокисляющими микроорганизмами показал, что образец не токсичен на третьем месяце. Почва с 10%-ным нефте-

загрязнением и с углеродоксиляющими микроорганизмами осталась токсичной, что говорит либо о недостатке углеродоксиляющих микроорганизмов, либо о недостатке в количестве сорбента.

Таблица 3. Результаты анализа модельных образцов на тест-объекте инфузории (*Paramecium caudatum* Ehrenberg) за три месяца

Название образца	В начале эксперимента			3 месяца		
	Индекс токсичности, %	Величина летальной кратности разбавления ЛКР ₅₀	Оценка тестируемой пробы (оказывает токсическое действие/ не оказывает)	Индекс токсичности, %	Величина летальной кратности разбавления ЛКР ₅₀	Оценка тестируемой пробы (оказывает токсическое действие/ не оказывает)
П	0	без	не оказывает	0	без	не оказывает
П+3%Н	52,6	10	оказывает	50,0	10	оказывает
П+5%Н	65,5	10	оказывает	52,6	10	оказывает
П+10%Н	100	100	оказывает	100	100	оказывает
П+КТС	0	Без	не оказывает	0	без	не оказывает
П+3%Н+КТС	55,2	10	оказывает	30,5	без	не оказывает
П+5%Н+КТС	64,4	10	оказывает	40,4	без	не оказывает
П+10%Н+КТС	100	100	оказывает	74,6	100	оказывает

При разливе, где содержание нефти не более 5% достаточно перемешать комплексный торфяной сорбент с нефтезагрязненной почвой и оставить до полного окисления нефти (при содержании нефти в почве до 5% за 3 месяца концентрация загрязнителя уменьшилась на 79,2%). Микроорганизмы после нехватки питания (нефти) погибнут, тогда как питательные элементы, содержащиеся в торфе, помогут восстановиться почве. При загрязнении почвы свыше 5% нефти очистка комплексным торфяным сорбентом может осуществляться несколькими способами: дополнительное внесение комплексного торфяного сорбента;

проведение рекультивации в несколько этапов; увеличение срока очистки до 6 месяцев.

Литература

1. Германова С.Е. Методы очищения почв от нефтепродуктов / С.Е.Германова, Н.Б.Самброс, Н.В.Петухов, Т.А.Рыжова // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2019. – № 4. – С.63-65.
2. Мусеев Т.С. Анализ современных сорбентов, на основе материалов органического происхождения / Т.С.Мусеев, К.В.Солдатов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 1-1. – С.69-73.
3. ГОСТ 33627-2015 Стандартный метод определения сорбционных характеристик адсорбентов. Издания. Межгосударственный стандартный книжный номер. Использование и издательское оформление. – М: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
4. ПНД Ф16.1;2.21-98 Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «ФЛЮОРАТ-02» Издания. Использование и издательское оформление. – М.: ООО Люмэкс, 1998. – 31 с.
5. Лисовицкая О.В. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения / О.В.Лисовицкая, В.А. Терехова // Доклады по экологическому почвоведению. – 2010. – № 1. – С.1-18.
6. Терехова В.А. Стандартный алгоритм измерений фитотестов: учебное пособие / В.А.Терехова, Л.П.Воронина, А.П.Кирюшина, Е.В.Морачевская, К.А.Кыдралиева. – Москва, 2021. – 56 с.
7. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 Т 16.1:2:2.3:3.7-04 Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beiger) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. Издания. Использование и издательское оформление. – Красноярск: ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, 2021. – 24 с.
8. ПНД Ф 14.1:2:3.13-06 16.1:2.3:3.10-06 Методика определения токсичности отходов, почв, осадков сточных вод методом биотестирования с использованием равноресничных инфузорий *Paramecium caudatum* Ehrenberg. Издания. Использование и издательское оформление. – Москва: МГУ, 2013. – 19 с.

ОСОБЕННОСТИ НАБУХАНИЯ И ВЛАГОУДЕРЖИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА СЕТЧАТЫХ АНИОННЫХ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ СШИВКИ

*Ильясов Л.О.¹, Шибатов А.В.^{2,3}, Панова И.Г.¹, Куцев П.О.⁴,
Филиппова О.Е.², Ярославов А.А.¹*

*Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,
Химический факультет, г. Москва, Россия*

²*Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,
Физический факультет, г. Москва, Россия*

³*Карагандинский Государственный Университет им. Е. А. Букетова,
Химический факультет, г. Караганда, Казахстан*

⁴*Воронежский Государственный Университет,
Химический факультет, г. Воронеж, Россия*

illeo98@mail.ru

Суперабсорбирующие гидрогели (САГ) относятся к числу перспективных материалов для агрохимии и сельского хозяйства благодаря их способности поглощать и удерживать значительное количество влаги. САГ представляют собой мягкие материалы, свойства которых определяются химически сшитой полимерной сеткой. Основными практически значимыми функциями САГ являются снижение расхода воды при орошении и увеличение количества доступной для растений влаги в почве. В сельском хозяйстве широко используются синтетические сшитые сополимеры, состоящие из акриламида и акриловой кислоты или ее солей, акрилатов. Акриламидные звенья хорошо совместимы с водой и образуют водородные связи с молекулами H₂O, что, в сочетании с большим отрицательным зарядом, создаваемым диссоциированными акрилатными звеньями, обеспечивает отличную набухаемость сополимеров в водных растворах [1, 2].

В последнее время в качестве водоудерживающих агентов все чаще рассматриваются биоразлагаемые ионные полимеры (полиэлектролиты, ПЭ) природного происхождения [1, 3]. Однако такие биополимеры как целлюлоза, крахмал, альгинаты и лигнин сами по себе не способны образовывать САГ [1]. Поэтому для улучшения водоудерживающих свойств природные

полимеры комбинируют с синтетическими. Акриламид-акрилатные фрагменты улучшают механические свойства комбинированных гидрогелей в набухшем состоянии [1]. Кроме того, использование таких сополимеров снижает экологическую нагрузку на почву из-за биodeградации полисахаридных фрагментов [1, 3].

Движущей силой набухания полимерной сетки является градиент осмотического давления. Процесс развивается до тех пор, пока давление набухания частиц геля не сравняется с внешним давлением [4]. Суперабсорбирующая способность сшитых полимеров определяется не только химической природой сегментов, но и плотностью полимерной сетки, то есть содержанием сшивающих агентов. При добавлении воды полимерные цепи, первоначально собранные в компактные клубки, распрямляются, что обеспечивает увеличение объема полимерной сетки. Показано, что этот эффект ослабевает с ростом степени сшивки [2, 5]. В сельском хозяйстве сухие сшитые сополимеры помещают внутрь почвы, где они вынуждены набухать в ограниченном поровом пространстве под давлением почвенных частиц. Поэтому в последние годы возрос интерес к изучению фундаментальных закономерностей набухания САГ, помещенных в матрицу твердых частиц [4, 6]. В частности, было показано, что набухание сшитых полимеров в ограниченном пространстве и под действием внешнего давления уменьшается по сравнению со свободным состоянием [4, 6-8]. Набухаемость также снижается при уменьшении размера частиц твердого субстрата [4, 6]. Эти наблюдения указывают на наличие взаимосвязи между водоудерживающими свойствами и механическими характеристиками набухших полимерных сеток.

В настоящей работе на примере шести слабосшитых полиэлектролитов с одинаковым содержанием анионных групп (АГГ#) и варьирующимся содержанием сшивателя впервые проведена корреляция между степенью сшивки полимеров и их способностью к набуханию в песчаных субстратах, а также механическими и влагоудерживающими свойствами.

Сетчатые полиэлектролиты получали методом привитой сополимеризации мономеров акриламида и акрилата калия к основной цепи природного полисахарида крахмала; в качестве агента сшивки добавляли N,N'-метиленабисакриламид в содержании 0,04 (образец АГГ#1), 0,08 (АГГ#2), 0,14 (АГГ#3), 0,2

(АГГ#4), 0,4 (АГГ#5) и 1 вес.% (АГГ#6); в качестве инициатора – персульфат калия [7]. Далее содержание шшивателя обозначали как Q. Полученные сополимеры сушили и измельчали, впоследствии использовали фракцию 0,25-0,5 мм. Состав сополимеров подтверждали методом ИК-спектроскопии. Содержание карбоксильных групп, определенное методом потенциометрического титрования, составило $(6.2 \pm 0,1) \times 10^{-3}$ моль на 1 г сополимера.

В первую очередь изучали свободное набухание АГГ# в водном буферном растворе, рН 6,5. Степень набухания α определяли как отношение веса влаги, поглощенной сополимером, к весу сухого сополимера. Для всех АГГ# α увеличивалась со временем, достигая в итоге максимума. Равновесная α уменьшалась с увеличением Q: с 450 для АГГ#1 до 90 для АГГ#6. Затем аналогичные измерения были проведены для сухих сополимеров, смешанных с песком (мономинеральный узкодисперсный кварцевый песок с размером частиц 0,1-0,2 мм) при соотношении сополимера и субстрата 1 к 100. То есть набухание сополимеров происходило внутри порового пространства частиц песка, иначе в ограниченных условиях. В данном случае равновесная степень набухания в субстрате ($\alpha_{огр}$) для образца АГГ#1 составила 70, затем увеличивалась, достигая максимума для АГГ#3 (108), а затем последовательно уменьшалась для АГГ# с более высоким содержанием Q, вплоть до 60 для АГГ#6. Аналогичные результаты были получены и при использовании в качестве субстрата почвы (песчаная дерново-подзолистая почва с ~85% содержанием частиц размера $>0,05$ мм и ~15% $<0,05$ мм). На рис. 1 приведена гистограмма, отражающая равновесную степень набухания сополимеров в свободном состоянии и при помещении в песок/почву.

Полученные данные свидетельствуют о том, что: 1) степень набухания сополимеров в песке (серые столбцы) и почве (черные столбцы) заметно снижается по сравнению с набуханием в воде (белые столбцы); 2) для сополимеров, набухших в воде, происходит монотонное снижение α с увеличением Q, а для набухших в песке и почве наблюдается "колоколообразная" зависимость с максимумом для АГГ#3 при Q = 0,14 вес.%; 3) значения α для ополимеров, набухших в песке, выше значений α для сополимеров, набухших в почве. Можно объяснить полученные эффекты следующими причинами:

1) При помещении в твердый субстрат частицы сополимеров вынуждены набухать в ограниченном поровом пространстве. Набухание определяется балансом между упругостью гидрогеля и сопротивлением со стороны твердых частиц субстрата.

2) Сополимеры АГГ#1 и 2, обладающие самой низкой степенью сшивки, являются наименее упругими, что приводит к резкому снижению степени набухания этих двух образцов. Для них степень набухания снижается почти на порядок, в то время как для более упругих АГГ#3-6 – только в 2-3 раза. Данный факт приводит к появлению «колоколообразной» зависимости $\alpha_{огр}$ от Q .

3) Снижение степени набухания сополимеров в почвенном субстрате по сравнению с песчаным можно связать с тем, что почва характеризуется меньшим объемом свободного пространства вследствие наличия существенной доли мелкодисперсных частиц.

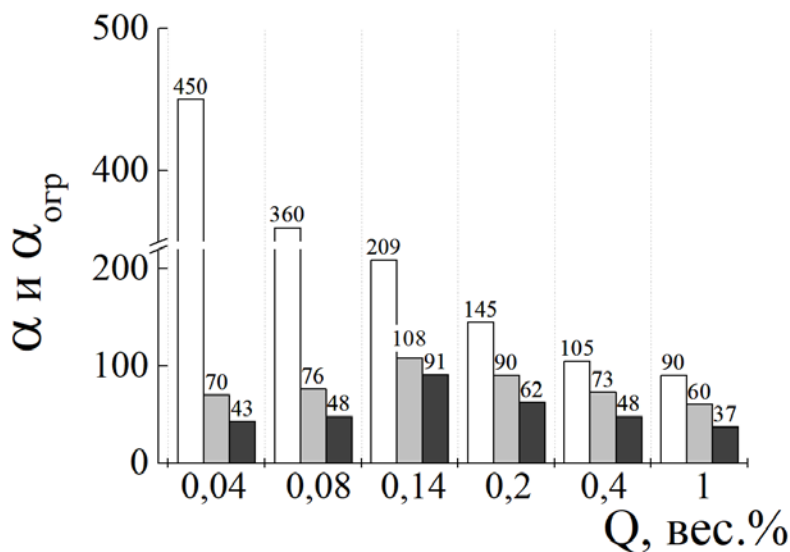


Рисунок 1. Степень набухания сополимеров АГГ# в 10-3 М фосфатном буфере с рН=6,5 в зависимости от Q : без песка/почвы (белые столбцы), в присутствии песка (серые столбцы) и поспе (черные столбцы). Соотношение масс субстрата и АГГ# 100: 1.

Определяющую роль механических свойств гидрогелей в эффективности набухания сетчатых полимеров как в свободном, так и ограниченном набухании подтверждают реологические характеристики набухших АГГ#: полученные с использованием ротационного реометра Physica MCR 301 (Anton Paar, Graz, Австрия) На рис. 2А в качестве иллюстрации приведены значения модуля накопления G' и модуля потерь G'' образцов АГГ#1, 4 и 6 в зависимости от угловой частоты колебаний сдвига. Графики зависимостей G' и G'' практически параллельны, причем значения G' выше, чем G'' , что свидетельствует о вязкоупругом отклике образцов. Зависимость G' , характеризующего упругий отклик образцов от Q , (рис. 2Б) имеет линейный характер вплоть до $Q \sim 0,3$ вес.%, затем незначительно увеличивается. Аналогичный результат описан ранее [11]; предполагалось, что это связано с большим количеством неоднородностей в полимерных сетках с высоким содержанием сшивающего агента.

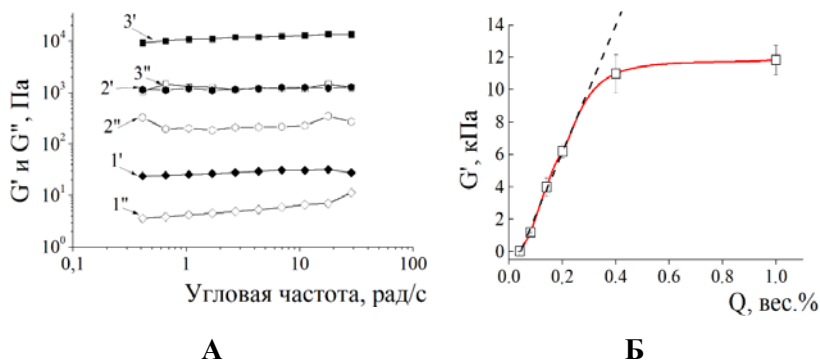


Рисунок 2. А) Модуль накопления G' (черные символы) и модуль потерь G'' (белые символы) в зависимости от угловой частоты колебаний сдвига АГГ#1 (1' и 1''), АГГ#4 (2' и 2'') и АГГ#6 (3' и 3''). Б) G' в зависимости от Q для гидрогелей АГГ#.

Как видно из рис. 2Б, модуль упругости для наиболее слабосшитого АГГ#1 существенно меньше прочих и составлял всего 25 Па. Для АГГ#6 он составил 11,8 кПа, что почти на три порядка выше, чем для АГГ#1. Для АГГ#2 модуль накопления составил 1,2 кПа, что все еще на порядок меньше самого большого

значения. Таким образом, поскольку именно от упругости гидрогелей зависит их способность сопротивляться внешнему давлению, гидрогели с меньшей степенью сшивки хотя и обладают длинными межузловыми цепями слабо набухают в песке и грунте. Максимально сшитые гидрогели характеризуются более короткими межузловыми цепями, что ограничивает их объем при набухании. Это, в итоге, и приводит к колоколообразной зависимости $\omega_{огр}$ от Q (рис. 1).

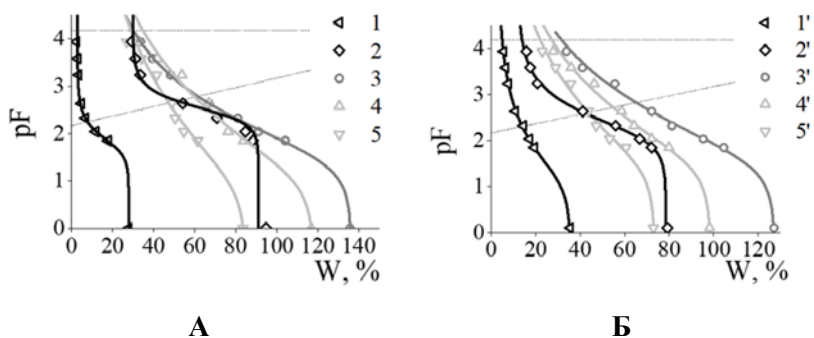


Рисунок 3. Кривые влагоудерживания для песка (А) и почвы (Б), содержащих АГГ#. Без АГГ# (1 и 1'), АГГ#1 (2 и 2'), АГГ#3 (3 и 3'), АГГ#4 (4 и 4') и АГГ#6 (5 и 5'). Образцы насыщали 10-3 М фосфатным буфером с рН 6,5. Пунктирными линиями показаны секущие Воронина [12]. Отношение веса субстрата к весу АГГ# 100 к 1.

Способность сетчатых полиэлектролитов к набуханию определяет и их влагоудерживающие характеристики в песчаном и почвенном субстратах. Были построены кривые влагоудерживания (КВУ), отражающие зависимость между логарифмом давления, приложенного к образцу, pF, и влажностью образца W, отражающей содержание удержанной образцом влаги. Кривые получали методом равновесного центрифугирования [9] и аппроксимировали по модели Ван-Генухтена [10]. Использовали сухие смеси субстратов с АГГ# при весовом соотношении 100 к 1, которым позволяли капиллярно насытиться влагой. На рис. 3А показаны КВУ для чистого песка и песка, смешанного с АГГ#. Для песка максимальная влажность при нулевом давлении составила $W_{\max} = 27\%$ (рис. 3А, кривая 1). При увеличе-

нии давления влажность понижалась до пренебрежимо малой уже при $pF = 2,5$, что соответствовало давлению ~ 31 кПа. Добавление АГГ# заметно сместило КВУ песка в сторону больших влажностей: W_{\max} для песка с добавлением АГГ#1 составила 95% (кривая 2), повысилась для АГГ#3 (кривая 3) до 136%, а для АГГ#4 и АГГ#6 вновь снизилась до 116% (кривая 4) и 83% (кривая 5) соответственно. То есть зависимость максимальной влагоемкости субстрата с АГГ# от содержания сшивателя носит такой же «колоколообразный» характер, как и значения $\alpha_{огр}$ от Q на рис. 1. Аналогичные результаты получены и в почвенном субстрате (рис. 3Б).

Таблица 1. Гидрофизические характеристики песка и почвы с 1 вес.% содержанием АГГ#. 10^{-3} М фосфатным буфером с pH 6,5.

Гидрофизический показатель	Q, вес.%						
	0	0.04	0.08	0.14	0.2	0.4	1
ПЕСОК							
W_{\max}	27	91	104	136	116	99	83
ПВ	4	52	46	61	60	54	47
ВЗ	1	30	23	30	34	31	29
ДДВ = ПВ - ВЗ	3	21	23	31	26	23	18
ПОЧВА							
W_{\max}	36	79	84	127	98	84	73
ПВ	14	41	45	65	55	47	44
ВЗ	5	14	18	32	27	23	22
ДДВ = ПВ - ВЗ	9	27	27	33	28	24	22

Полученные данные позволили оценить гидрофизические показатели смесей сополимер/песок и сополимер/почва с помощью двух секущих линий, соответствующих уравнениям $pF = 2,17 + W/100$ (1) и $pF = 4,18$ (2). Пересечение первой с КВУ дает наименьшую влагоемкость образца (полевая влагоемкость, ПВ), пересечение второй - влагу, недоступную для растений (влажность завядания, ВЗ) [12]. Разница между этими величинами определяет диапазон доступной для растений влаги

(диапазон доступной влаги) $ДДВ = ПВ - ВЗ$. В табл. 1 сведены гидрофизические характеристики для песка и почвы, а также для обоих субстратов, смешанных с шестью полимерными гидрогелями.

Как видно из табл.1, все гидрофизические показатели достигали максимума при

$Q = 0,14$ вес.%. При больших и меньших значениях Q показатели снижались на 10-50%. Эти изменения отражают способность гидрогелей поглощать и удерживать воду в смеси с песком и грунтом и хорошо коррелируют с колоколообразными графиками зависимости степени ограниченного набухания от Q (рис. 1).

Таким образом, продемонстрирована взаимосвязь между степенью сшивки сетчатых полиэлектролитов, с одной стороны, и ключевыми характеристиками гидрогелей в твердом субстрате – равновесной степенью набухания и водоудерживающими свойствами, с другой стороны. Эти характеристики приобретают максимальные значения при среднем значении $Q = 0,14\%$, когда достигается баланс между упругостью набухших полимерных гелей и сопротивлением со стороны твердых частиц. Полученные результаты представляют интерес для разработки оптимальных по составу сетчатых полиэлектролитов для использования в качестве водоудерживающих почвенных кондиционеров.

Финансирование. Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, номер договора 075-15-2022-1212 «Разработка и применение инновационных почвенных мелиорантов для повышения продуктивности и предотвращения деградации аридных земель».

Литература

1. Guilherme, M.R.; Aouada, F.A.; Fajardo, A.R.; Martins, A.F.; Paulino, A.T.; Davi, M.F.T.; Rubira, A.F.; Muniz, E.C. Super-absorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal* 2015, 72, 365-385.
2. Krasnopeeveva, E.L.; Panova, G.G.; Yakimansky, A.V. Agricultural Applications of Superabsorbent Polymer Hydrogels. *Int J Mol Sci* 2022, 23, 15134, doi:10.3390/ijms232315134.

3. Qureshi, M.A.; Nishat, N.; Jadoun, S.; Ansari, M.Z. Polysaccharide based superabsorbent hydrogels and their methods of synthesis: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 2020, 1, 100014.
4. Louf, J.-F.; Lu, N.B.; O'Connell, M.G.; Cho, H.J.; Datta, S.S. Under pressure: Hydrogel swelling in a granular medium. *Science Advances* 2021, 7, eabd2711.
5. Maitra, J.; Shukla, V. Cross-linking in hydrogels - a review. *Am J Polym Sci* 2014, 4, 25-31.
6. Misiewicz, J.; Lejcuś, K.; Dąbrowska, J.; Marczak, D. The Characteristics of Absorbency Under Load (AUL) for Superabsorbent and Soil Mixtures. *Scientific Reports* 2019, 9, 18098.
7. Ilyasov, L.O.; Panova, I.G.; Kushchev, P.O.; Belov, A.A.; Maksimova, I.A.; Smagin, A.V.; Yaroslavov, A.A. Sparsely Cross-Linked Hydrogel with Starch Fragments as a Multifunctional Soil Conditioner. *Journal of Composites Science* 2022, 6, 347.
8. Lejcus, K.; Spitalniak, M.; Dabrowska, J. Swelling Behaviour of Superabsorbent Polymers for Soil Amendment under Different Loads. *Polymers (Basel)* 2018, 10, 271.
9. Smagin, A.; Panova, I.; Ilyasov, L.; Ogawa, K.; Adachi, Y.; Yaroslavov, A. Water retention in sandy substrates modified by cross-linked polymeric microgels and their complexes with a linear cationic polymer. *Journal of Applied Polymer Science* 2021, 138, 50754.
10. van Genuchten, M.T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal* 1980, 44, 892-898.
11. Denisin, A.K.; Pruitt, B.L. Tuning the Range of Polyacrylamide Gel Stiffness for Mechanobiology Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2016, 8, 21893-21902.
12. Voronin, A. Energy concept of the physical state of soils. *Eur. Soil Sci* 1990, 23, 7-19.

НАНОТЕХНОЛОГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОБЛЕМЫ

Куликова Н.А.
Приглашенный лектор

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
kulikova-msu@yandex.ru*

В марте 2023 г. население Земли составляло 8,02 млрд. По прогнозам Департамента по экономическим и социальным вопросам Организации Объединенных Наций (ООН) к 2030 г. число жителей планеты составит 8,5 млрд., а к 2050 – 9,7 млрд. [2]. Несмотря на существующие альтернативные варианты прогнозов, согласно которым возможно снижение численности населения, российские демографы наиболее вероятным считают прогноз Департамента народонаселения ООН, согласно которому в ближайшее столетие вряд ли опустится ниже 7 млрд. [1]. Поэтому продовольственная безопасность, при которой все люди в каждый момент времени имеют физический и экономический доступ к достаточной в количественном отношении безопасной пище, необходимой для ведения активной и здоровой жизни, является одной из главных целей аграрной и экономической политики государства.

Программа ООН по окружающей среде выдвинула концепцию «безопасного рабочего пространства» – использование для нужд потребления не более 0,20 га пахотных почв на человека к 2030 г. Превышение этой величины может привести к необратимому ущербу для окружающей среды вследствие сокращения биоразнообразия, эмиссии CO₂, нарушения круговорота воды и питательных веществ. Поэтому в настоящее время остро стоит проблема повышения урожайности различных сельскохозяйственных культур [2].

«Зеленая революция», известная также как Третья сельскохозяйственная революция и начавшаяся более шести десятилетий назад, обеспечила необходимый ежегодный прирост урожайности при минимальном расширении землепользования за счет применения химических удобрений, прежде всего, недоро-

гих азотных удобрений, обеспечиваемых технологией Габера-Боша; контролируемого орошения и средств механизации; внедрения высокоурожайных сортов зерновых культур, особенно карликовой пшеницы и риса, а также широкого использования пестицидов. Однако методы и технологии «зеленой революции» в настоящее время часто признаются малоэффективными, а их использование часто вызывает неприемлемое ухудшение состояния окружающей среды. Низкая эффективность использования применяемых агрохимикатов и потери урожая из-за болезней и засухи приводят к массовым потерям энергии и воды, а также к загрязнению окружающей среды устойчивыми ксенобиотиками, что создает риски для здоровья человека. Монокультурное земледелие, деградация почв, нехватка воды и глобализация болезней привели к тому, что сельскохозяйственные системы обладают низкой устойчивостью. Повсеместное и неэффективное использование пестицидов вызывает появление устойчивых биотипов вредителей, снижение биоразнообразия и нарушение экосистемных функций почвы, необходимых для здоровой агроэкосистемы. Все эти факторы приводят к выравниванию кривых урожайности, что указывает на окончание «зеленой революции» [5].

Поэтому в настоящее время актуальным является поиск новых подходов и материалов в области сельского хозяйства для повышения его эффективности и устойчивости. Одними из наиболее перспективных с этой точки зрения являются инженерные наноматериалы [5–7]. Небольшие размеры наноматериалов позволяют им поступать в сосудистую систему растений при корневых или внекорневых подкормках, что может быть новым эффективным путем доставки питательных веществ и пестицидов. Многие наноматериалы являются метастабильными и, следовательно, могут обеспечивать контролируемое высвобождение питательных микроэлементов, пестицидов или антибиотиков для повышения устойчивости сельскохозяйственных растений и животных к болезням [3]. Структура и химический состав поверхности наноматериалов могут быть модифицированы для придания им необходимых функциональных свойств. Поэтому наноматериалы имеют множество потенциальных применений в сельском хозяйстве для повышения продуктивности и качества сельскохозяйственных культур и улучшения состояния почвы.

В качестве основных направлений использования наноматериалов и нанотехнологий наиболее часто рассматривают следующие:

- повышение эффективности использования воды, света и агрохимикатов (использование наноматериалов и технологий очистки для получения воды сельскохозяйственного назначения достаточно высокого качества из нетрадиционных источников (например, муниципальных сточных вод); использование биосенсоров на базе растений для мониторинга потребности в воде на уровне отдельных растений для обеспечения точного полива, позволяющего экономить воду; использование внекорневых подкормок наноматериалами, позволяющими повысить эффективность фотосинтеза растений; применение наноудобрений и нанопестицидов);

- улучшение функционирования почвы (внесение наноматериалов в почву для повышения биодоступности макро- и микроэлементов или их контролируемого высвобождения; применение различных нанокатализаторов для очистки);

- повышение стрессоустойчивости сельскохозяйственных культур (создание генетически модифицированных организмов; использование наноматериалов для повышения у сельскохозяйственных культур засухоустойчивости, жароустойчивости, устойчивости к засолению и др.);

- контроль патогенов в сельскохозяйственной продукции (разработка биосенсоров для экспресс-определения патогенов; создание упаковки из наноматериалов, предотвращающих загрязнение сельскохозяйственной продукции патогенами; создание наноматериалов, предотвращающих развитие патогенов в сельскохозяйственных организмах).

Несмотря на доказанную перспективность использования наноматериалов в сельском хозяйстве, в настоящее время все еще существует множество проблем, которые необходимо преодолеть, чтобы в полной мере реализовать потенциал нанотехнологий для сельского хозяйства. Важнейшими препятствиями на пути их быстрого и широкого внедрения являются отсутствие понимания взаимодействия наноматериалов с живыми организмами и окружающей средой. В частности, механизмы поступления наноматериалов в растения и действия на растительные организмы неизвестны. Данные о поведении наноматериалов в почве и их влиянии на почвенные свойства также весьма огра-

ничены. До сих пор не существует единого мнения о токсичности наноматериалов: в литературе можно встретить данные как о их полной безопасности, так и о чрезвычайно высокой токсичности. Причинами этого являются, с одной стороны, отсутствие разработанных стандартных подходов к оценке токсичности наноматериалов, а, с другой, недостаточная продолжительность времени, в течение которого люди интенсивно взаимодействуют с наноматериалами. Наконец, важной проблемой является восприятие безопасности сельскохозяйственной продукции, получаемой с использованием наноматериалов, потребителями [4].

Таким образом, коммерческое использование инженерных наноматериалов в сельском хозяйстве требует проведения дополнительных исследований, направленных на изучения их взаимодействия с организмами и оценку судьбы в окружающей среде. При этом особое внимание следует уделять исследованию в полевых условиях, так как большинство данных о наноматериалах в настоящее время основаны на экспериментах, проведенных в контролируемых условиях, что часто приводит к невозможности экстраполировать результаты на реальные условия окружающей среды.

Финансирование. Работа выполнена в рамках НИР «Разработка и оценка комплекса инновационных агрохимических средств, мелиорантов и регуляторов роста в условиях агро-, техногенеза и городской среды» (номер ЦИТИС 121041300098-7).

Литература

1. Гурьянов Н. Население Земли резко сократится. Какое будущее ждет Россию. РИА новости, 31 марта 2023. Интернет-ресурс: <https://ria.ru/20230331/naselenie-1861896371.html>. Дата обращения: 18.07.2023.
2. Хомяков Д.М. «Климатически нейтральное» сельское хозяйство и «зеленая» агрохимия как инструменты обеспечения продовольственной безопасности и сохранения почв. Ресурсосберегающее земледелие, 2023, 1(57). Интернет-ресурс: <https://agriecomission.com/base/klimaticheskii-neitralnoe-selskoe-hozyaistvo-i-zelenaya-agrokhimiya-kak-instrumenty-obespecheniya-prodovolstvennoi-bezopasnosti-i-sohraneniya-pochv>. Дата обращения: 18.07.2023.

3. Kah M., Tufenkji N., White J.C. Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection // *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(6), 532–540. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0439-5> (2019).
4. Lombi E., Donner E., Dusinska M., Wickson F. A One Health approach to managing the applications and implications of nanotechnologies in agriculture // *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(6), 523–531. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0460-8>.
5. Lowry G.V., Avellan A., Gilbertson L.M. Opportunities and challenges for nanotechnology in the agri-tech revolution // *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(6), 517–522. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0461-7>.
6. Prasad R., Bhattacharyya A., Nguyen Q.D. Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 20(8), 1014. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014>.
7. Usman M., Farooq M., Wakeel A., Nawaz A., Cheema S.A., Rehman H.U., Ashraf I., Sanaullah M. Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities // *Science of the Total Environment*, 2020, 15(721), 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>.

ПРИМЕНЕНИЕ БИОУГЛЯ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ CO₂ ИЗ ГОРОДСКИХ ПОЧВ ПОД ГАЗОННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

Максаева Е.С., Кулачкова С.А.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
katerina.fedanina@yandex.ru, kulachkova_sa@inbox.ru*

Концентрация углекислого газа в атмосфере в настоящее время увеличилась на 149% от доиндустриального уровня и продолжает расти, с чем связывают глобальные изменения климата на планете [9]. Примерно 30% поступающего в атмосферу CO₂ связано с почвенным дыханием [1]. На международном уровне и в РФ приняты стратегии по сокращению выбросов парниковых газов и увеличению их поглощения [2, 5]. Одним из способов снижения эмиссии CO₂ из почв может быть использование биоугля, для города эта возможность практически не изучалась, что определяет актуальность и новизну наших исследований.

Биологический уголь (биоуголь) – высокоуглеродистый продукт, получаемый пиролизом биомассы при температурах 300-800 °С, используемый для внесения в почву с целью секвестрации углерода биомассы и для улучшения почвенных физико-химических свойств. Известно, что биоуголь повышает вододерживающую способность почв в среднем на 6–15%, улучшает агрегатное состояние, увеличивает общую пористость почвы, усиливает сопротивление почв к механическим нагрузкам [4]. Для различных агропочв установлена возможность снижения эмиссии CO₂ и накопление углерода в почвах при добавлении биоугля [7], показано, что влияние биоугля зависит от его дозы. Биоугли, произведенные при разных температурах, могут влиять на эмиссию CO₂ по-разному. Так, биоуголь, полученный при 300⁰С увеличивал, а при 450, 500 и 600⁰С снижали совокупные выбросы CO₂ в инкубационных экспериментах [8, 11].

Работы, посвященные применению биоуглей для секвестрации углерода в городских почвах единичны. В них показано, что почва с добавлением биоугля может быть эффективным методом

увеличения потенциала накопления углерода [6], а также что применение биоугля осадков сточных вод приводило к улучшению плодородия городских почв, питания и роста газонных растений [10].

Целью исследования была оценка эмиссии CO_2 из образцов почв вегетационного опыта с внесением биоуглей и посевом газонных трав.

Объектом исследования выступили образцы серогумусового горизонта городской почвы, отобранной в Ботаническом саду МГУ на Ленинских горах с участка с многолетним газоном.

Методы исследований. Вегетационный опыт проводился в течение 3-х месяцев. Регулярно определялась эмиссия CO_2 камерным методом со временем экспозиции 3 минуты (за это время концентрация CO_2 нарастала в камере линейно) и количественным анализом на газовом хроматографе Кристаллюкс 4000М с детектором по теплопроводности. В светонепроницаемых камерах измерялись потоки, обусловленные дыханием почвенных горизонтов и растений. Параллельно с эмиссией измерялась температура почвы (электронным термометром Checktemp (Hanna Instruments)) и влажность путем взвешивания. pH водной суспензии биоуглей определялся потенциометрическим методом (соотношение биоуголь: почва 1:2,5); содержание общего углерода в биоуглях – методом сухого сжигания на Primacs SNC100-IC (SKALAR, Нидерланды), в серогумусовом горизонте почв – методом Тюрина с фотометрическим окончанием.

В вегетационном опыте использовались четыре вида биоуглей: два биоугля производства ООО «Вятская угольная компания», изготовленных из березовой древесины – «Березняк Биочар» (далее ББ, T производства 500-600⁰С, рНН₂О 8,2, С 83,7%) и «Березняк Активированный уголь» (далее БАУ, T производства 900⁰С рНН₂О 9,9, С 85,6%); биоуголь ООО Энерголеспром, изготовленный из растительной биомассы без уточнения (далее БЭ, T производства 500⁰С, рНН₂О 7,9, С 67,5%) и «Биочарка» Termalica ООО «ВИСОЛ ОПТ», изготовленный из хвойных пород древесины (далее БТ, T производства 600⁰С рНН₂О 9,8, С 60-80%).

Опыт закладывался следующим образом. На дно вегетационных сосудов (объем 1 л) помещался слой керамзита (масса 55 г), далее - геотекстиль, затем – воздушно-сухой, просеянный через сито 3 мм почвенный серогумусовый горизонт (643,6 г;

рНН₂O – 6,5, Сорг 7,1%), и сверху – тонкий слой биоугля (6,4 г). Доза внесения биоугля составила 1% по массе [3]. Сверху на почву помещалось основание для эмиссионной камеры. Сосуд с конструкцией из керамзита, геотекстиля и почвы с биоуглем, основанием для камеры взвешивался. Почва в сосуде увлажнялась дистиллированной водой до 60% полной влагоёмкости, что соответствует оптимальной влажности для функционирования биоты. После полива сосуд с содержимым снова взвешивался и в дальнейшем влажность поддерживалась путем добавления воды до первоначальной массы. Сосуды прединкубировали в течение 7 суток при комнатной температуре, в это время поверхность почв была прикрыта полиэтиленовым пакетом во избежание избыточной потери влаги. Затем в течение недели измеряли эмиссию CO₂ для установления постоянного начального уровня. Через 2 недели от закладки опыта посеяли газонную смесь (13.03.2023). Состав газона: райграс однолетний 18%; райграс многолетний 20%; овсяница красная 45%; мятлик 12%; тимофеевка 5%. Измерение эмиссии CO₂ и гидротермических параметров проводили через одни сутки после посева, далее раз в неделю в течение 2-х месяцев и потом 2 раза в месяц. Срез травы осуществлялся 11.04, 12.05 и 14.06.2023 г.

В опыте контролировались температура и влажность почвы. В день измерений эмиссии CO₂ температура в сосудах варьировала в пределах 0,7-2,5⁰С, влажность – в пределах 0,5-2,4% (эмиссия определялась на следующие сутки после полива).

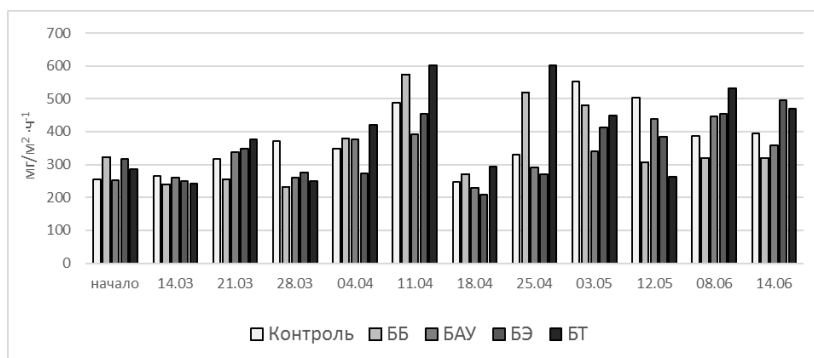


Рисунок 1. Эмиссия CO₂ в вегетационных сосудах с серогумусовым горизонтом, разными биоуглями и газонными травами (медианы, n=3)

В первые две недели эксперимента без растений (рис. 1, начало и 14.03) в вариантах с биоуглями эмиссия CO_2 не отличалась от контроля или была в 1,1-1,3 раза выше. После посева газонной травы эмиссия CO_2 стабильно увеличивалась каждую неделю по мере отрастания растений в первый месяц во всех вариантах опыта. После первого и второго укоса эмиссия CO_2 повышалась до третьей недели роста травы и снижалась к концу месяца. Активированный биоуголь (вариант БАУ) почти всегда снижал эмиссию CO_2 по сравнению с контрольным вариантом на 10-40% (в дни измерений, когда снижения не наблюдалось, превышение контроля было не больше 10%). Стабильное снижение эмиссии CO_2 отмечено и для варианта «Березняк биочар» через полтора месяца эксперимента. Как и с вариантом БАУ снижение составляло 10-40%. В течение первых двух месяцев опыта биоуголь БЭ уменьшал эмиссию CO_2 на 10-30% по сравнению с контролем, но в третий месяц этот эффект перестал наблюдаться. Применение биоуголя БТ практически не приводило к уменьшению эмиссии CO_2 .

Эмиссия CO_2 в вегетационном эксперименте в значительной степени определялась дыханием растительности. На рисунке 2 представлены результаты оценки свежей фитомассы газонной травы, выросшей под влиянием различных биоуглей. В первый месяц биоуголь БТ сильнее всех стимулировал рост растений, но на второй и третий месяцы это влияние прекратилось. Биоугли ББ и БАУ не способствовали более активному росту травы в первый месяц, но и не привели к снижению фитомассы в третий.

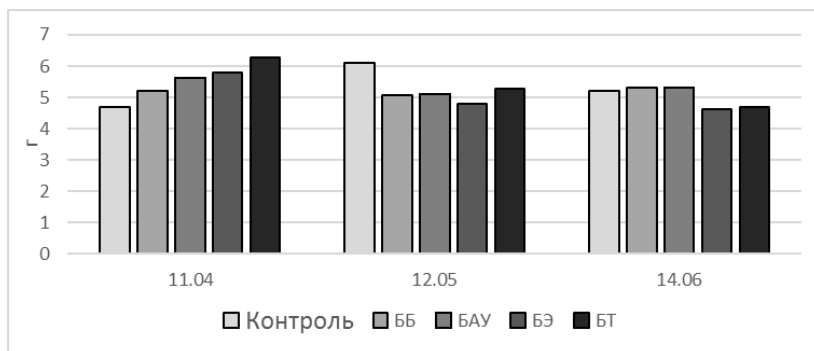


Рисунок 2. Свежая фитомасса растений в экспериментах с различными биоуглями

Таким образом, вегетационный опыт показал, что применение некоторых видов биоуглей целесообразно для ограничения эмиссии CO₂ при создании и поддержании газонов. Наибольший эффект на снижение выделения CO₂ в атмосферу оказал биоуголь, произведенный из березовой древесины при температуре 900⁰C, влияние на фитомассу при этом было незначительное.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800147-0 «Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов»).

Литература

1. Кудяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049-1060.
2. Парижское соглашение [Электронный ресурс] / URL: <https://docs.cntd.ru/document/542655698> (дата обращения 30.07.2023).
3. Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Павлик С.В., Балашов Е.В. Применение биоугля в сельском хозяйстве Российской Федерации. Методические рекомендации. – Спб.: АФИ, 2014. – 28 с.
4. Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С., Балашов Е.В. Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // Почвоведение. 2015. № 2, с. 211-220.
5. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года / Распоряжение Правительства от 29 октября 2021 г. № 3052-р
6. Ariluoma M., Ottelin J., Hautamaki R., Tuknkanen E.-M., Manttari M. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki // Urban Forestry & Urban Greening 57, 2021, 126939. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126939>
7. Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change // Geoderma, 123, 2004, 1-22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032
8. Sheng Y., Zhu L. Biochar alters microbial community and carbon sequestration potential across different soil pH // Science of the Total En-

vironment 622–623, 2018, 1391–1399.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.337> 0

9. State of Global Climate 2021. WMO Provisional report. 47 с. Электронный ресурс:
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10859
(дата обращения 30.07.2023).
10. Tian Y., Cui L., Lin Q., Li F., Zhao X. The sewage sludge biochar at low pyrolysis temperature had better improvement in urban soil and turf grass // *Agronomy*. 2019, 9, 156; doi:10.3390/agronomy9030156
11. Yang Y., Sun K., Liu J., Chen Y., Han L. Changes in soil properties and CO₂ emissions after biochar addition: Role of pyrolysis temperature and aging // *Science of the Total Environment* 839, 2022, 156333.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156333>.

**СОРБЦИОННАЯ БИОРЕМЕДИАЦИЯ
НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ В
НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕМ РЕГИОНЕ НА СЕВЕРЕ
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

*Михедова Е.Е.¹, Васильева Г.К.¹, Стрижакова Е.Р.¹,
Ахметов Л.А.², Филонов А.Е.²*

¹*ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт физико-химических и биологических
проблем почвоведения РАН, 142290, Россия, г. Пушкино*

²*ФИЦ ПНЦБИ РАН, Институт биохимии и физиологии
микроорганизмов РАН
lizamihedova@gmail.com*

Аннотация. В результате двух- и трехлетних лабораторных и микрополевых экспериментов с минеральными подзолистыми почвами, отобранными на незагрязненной территории в нефтедобывающем регионе Северо-Западной Сибири, был разработан метод сорбционно-биологической очистки минеральных почв, загрязненных сырой нефтью в дозах от 6 до 15%, основанный на внесении композитного сорбента (смесь торфа, гранулированного активированного угля и диатомита) совместно с биопрепаратом Микробак на основе углеводов-окисляющих микроорганизмов. Эффективность метода подтверждена в полевых условиях вблизи г. Сургута на литострате песчаном, загрязненном 15% нефти. К концу 2-го сезона суммарная концентрация углеводородов нефти снизилась до уровня регионального ПДК (15 г/кг), а фито- и биотоксичность почвы до минимума (<20%), тогда как при внесении одного биопрепарата почва оставалась высокотоксичной.

Введение. На сегодняшний день Российская Федерация является одной из богатейших стран мира по запасам нефти и газа. Однако, при добыче и транспортировке нефти и нефтепродуктов в России ежегодно происходит более 13 тыс. нефтеразливов. Особенно чувствительны к нефтяному загрязнению экосистемы на севере Западной Сибири, в частности почвы на территории ЯНАО и ХМАО, где добывается более 60% всей Российской нефти. Другим источником нефтяного загрязнения почв Арктического региона могут быть аварийные ситуации при разливе

жидкого топлива в местах его хранения, ярким примером которой стал аварийный разлив 21 тыс. тонн дизельного топлива под Норильском в мае 2020 г. Поэтому разработка эффективных методов очистки нефтезагрязненных почв Северных территорий Западной Сибири особенно актуальна.

Ранее в лаборатории физикохимии почв ИФХиБПП РАН была разработана методика сорбционной биоремедиации нефтезагрязненных почв центрального региона России: серой лесной, черноземной и аллювиально-луговой [1, 3, 11-13]. Установлено, что проведение биоремедиации почв, сильно загрязненных нефтью и нефтепродуктами (дизельное топливо и отработанное моторное масло) резко ускоряет процесс биоремедиации разных типов почв при исходном уровне загрязнения 10-15%. Положительное влияние гранулированного активированного угля (ГАУ) и торфа продемонстрировано также в наших совместных экспериментах на почвах Арктического региона Европейской части РФ, исторически загрязненных дизельным топливом и отработанным моторным маслом [5, 10]. Целью данных исследований было адаптировать разработанную технологию для очистки от нефти минеральных почв нефтегазоносных территорий на севере Западной Сибири.

Объекты. В экспериментах использовали три типа минеральных почв, отобранных из верхнего минерального слоя на незагрязненных участках вблизи нефтяных месторождений. Все почвы кислые, слабогумусированные, легкого гранулометрического состава (Таблица 1). В экспериментах использовали сорбенты натурального происхождения трех классов: минеральные (каолинит, цеолит, диатомит, вермикулит вспученный); органические (торф верховой нейтрализованный, Спилсорб) и углеродистые, в том числе: ГАУ и композитный сорбент АУД на основе ГАУ и диатомита, а также композитный сорбент КС на основе АУД и торфа.

Методы. Во всех экспериментах почвы поверхностно загрязняли сырой нефтью в дозах от 6 до 15%, а через 1-2 сут почву перемешивали. После этого почву обрабатывали методом биоаугментации путем внесения биопрепаратов на основе УОМ, разработанных в ИБФМ РАН [9] на фоне внесения комплексных минеральных удобрений (азофоска) для создания соотношения С:N:P:K=10÷30:1:0,4:0,8, а также доломитовой муки для нейтрализации избыточной кислотности. Суммарное содержание УВН

в почве определяли сертифицированным методом ИК-спектрометрии [6]. Кроме того, определяли содержание окисленных производных углеводов – ОУВН, как описано в [12], а также смолисто-асфальтеновой фракции нефти (САФ) гравиметрическим методом [7]. Определяли дегидрогеназную активность почв, а также численность углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) методом высева на минимальные агаризованные среды, где источником углерода и энергии служили пары дизельного топлива. В ходе обработки определяли фитотоксичность почв экспресс-методом по всхожести клевера белого (*Trifolium repens*) [14], а в конце каждого сезона определяли также интегральную токсичность почв сертифицированным методом: по изменению фитотоксичности, оцениваемой по длине корней проростков пшеницы, а также по смертности и размножению *Daphnia magna* [2, 8]. Наблюдали также за изменением агрохимических и физических характеристик почвы стандартными методами [4]. Структуру почвы изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа. Анализы выполнены в ЦКП ИФХиБПП РАН.

Таблица 1. Характеристики минеральных почв, использованных в экспериментах

Место отбора	Тип почвы	$S_{орг}$, %	pH_v	Гран. состав по Качинскому
г. Новый Уренгой	Глеево-подзолистая	0,60	5,9	супесчаная
г. Нижнеартовск	Подзол иллювиально-железистый	0,86	5,7	супесчаная
г. Сургут	Литострат песчаный	0,13	5,8	супесчаная

Результаты. На первом этапе, в условиях вегетационного эксперимента было установлено, что внесение оптимальных доз всех изученных сорбентов существенно ускоряет темпы биоремедиации глеево-подзолистой почвы, отобранной вблизи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (ЯНО), загрязненной легкой нефтью в дозе 7%. Хотя снижение концентрации УВН ускорялось не столь значительно, однако в присутствии сорбентов накапливалось меньше токсичных продуктов

окисления – ОУВН, а также резко снижалась фитотоксичность почв, тогда как в контроле почва проявляла высокую фитотоксичность до конца наблюдений – 15 мес. Наилучший результат показал смешанный сорбент АУД в дозе 5%.

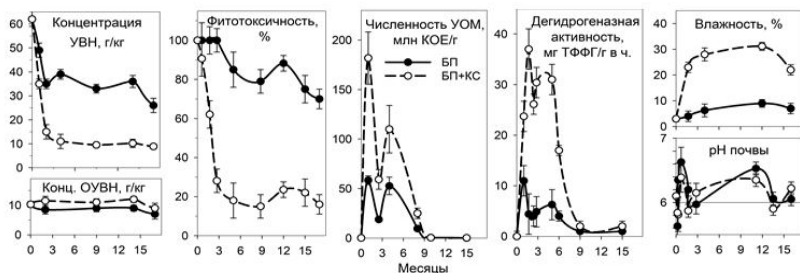


Рисунок 1. Динамики снижения концентрации УВН и ОУВН в глеево-подзолистой почве, загрязненной 12% нефти, а также фитотоксичности почвы, численности УОМ, дегидрогеназной активности (ДГА), влажности и рН почвы в ходе ее биоремедиации путем внесения биопрепарата Микробак: отдельно (БП) и в комбинации с сорбентом (БП+КС).

На втором этапе в условиях микрополевого эксперимента изучено влияние сорбентов на скорость биоремедиации подзола иллювиально-железистого, отобранного вблизи Самотлорского нефтяного месторождения. Разработан композитный сорбент КС, внесение которого резко ускоряло процесс биоремедиации, особенно при высоком уровне загрязнения – 12% нефти (рис. 1). Биотестирование показало, что до конца 3-го сезона сильнозагрязненная почва, обработанная одним биопрепаратом, проявляла высокую фито- и биотоксичность. В то же время в вариантах с добавками КС к концу 2-го сезона суммарная концентрация УВН снизилась до регионального ПДК=15 г/кг на фоне меньшего накопления смолисто-асфальтеновой фракции (САФ), а токсичность почвы - до минимума (<20%). Механизм положительного действия сорбента объясняется снижением токсичности почвы за счет преимущественно обратимой сорбции поллютантов. Кроме того, в присутствии композитного сорбента в результате снижения гидрофобности почвы повышается ее влагоемкость, а, следовательно, поддерживается оптимальная полевая влажность почвы. Это обеспечивает условия для активации

микроорганизмов-деструкторов, как инокулированных в виде биопрепарата, так и аборигенных, что подтверждается более высоким уровнем дегидрогеназной активности почвы и численности УОМ в почве с сорбентом по сравнению с контролем, обработанным одним биопрепаратом.

На третьем этапе высокая эффективность разработанного метода была подтверждена в условиях полевого эксперимента, заложенного на территории производственного объекта компании «Транснефть» вблизи г. Сургута. В почву разных вариантов вносили сорбент КС в дозе 10 или 20%, а также биопрепарат «Микробак» (БП, из расчета 10^7 кл./г): вместе и отдельно. Через 2 месяца обработки почву засеяли травосмесью. На рис. 2 показано влияние БП и двух доз КС на остаточное содержание УВН и САФ, а также на снижение фито- и биотоксичности почвы в конце 1-го и 2-го сезонов.

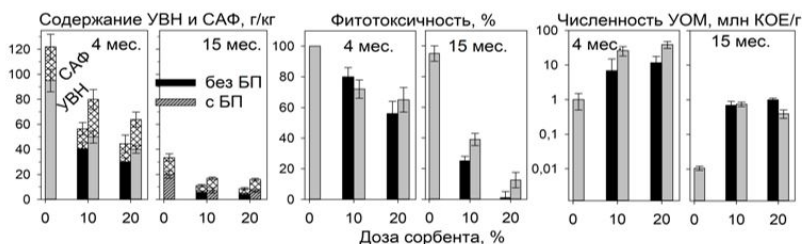


Рисунок 2. Влияние дозы композитного сорбента (10 и 20% КС) и БП, отдельно и в комбинации, на остаточное содержание УВН и САФ в литострате песчаном, загрязненном 15% нефти, а также на его фитотоксичность и численность УОМ через 4 и 15 мес. обработки, при апробации метода в полевых условиях вблизи г. Сургута

Заключение. Таким образом, метод сорбционно-биологической очистки минеральных почв, отобранных на Севере Западной Сибири, основанный на внесении композитного сорбента на основе торфа, гранулированного активированного угля и диаомита, подтвердил свою эффективность в полевых условиях вблизи г. Сургута на литострате песчаном, загрязненном 15% нефти.

Благодарности: Авторы выражают благодарность сотрудникам компании «Транснефть» за помощь в проведении эксперимента на ЛПДС Западный Сургут.

Литература

1. Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Бочарникова Е.А., Семенюк Н.Н., Яценко В.С., Слюсаревский А.В., Барышникова Е.А. Нефть и нефтепродукты как загрязнители почв. Технология комбинированной физико-биологической очистки загрязненных почв // Российский химический журнал. 2013; 57(1):79-104.
2. ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений. От 01.01.2011.
3. Зиннатшина Л.В. Стрижакова Е.Р., Даньшина А.В., Васильева Г.К. Влияние сорбентов на скорость биоремедиации и свойства почвы, загрязненной смесью нефтепродуктов // Естественные и технические науки. 2018; 9:24-30.
4. Михедова Е.Е., Васильева Г.К., Стрижакова Е.Р., Узорина М.И., Ахметов Л.А. Влияние натуральных сорбентов на скорость биоремедиации глеево-подзолистой почвы северной части Западной Сибири // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2023, №3 (в печати).
5. Мязин В.А., Исакова Е.А., Васильева Г.К. Влияние гранулированного активированного угля на скорость биоремедиации почв Мурманской области, исторически загрязненных нефтепродуктами // Проблемы Региональной Экологии. 2020, 2:20-26.
6. ПНДФ 16.1:2.2.22-98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органометаллических, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. М., 2005. 21 с.
7. ПНДФ 16.1.41-04. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом. М.: Минприроды РФ, 2004 г., 11 с.
8. СП 2.1.7.1386-03. Санитарные правила по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления, от 30.06.2003. Москва. 20 с.
<https://pek-eco.ru/upload/iblock/ea0/ea06d7257262a2666477c76ea3e14a67.pdf>.
9. Филонов А.Е. и др. Режимы раздельного и совместного культивирования микроорганизмов-деструкторов нефти родов *Pseudomonas* и *Rhodococcus* // Биотехнология, 2008, 6:90-95.

10. Myazin V.A., Korneikova M.V., Chaporgina A.A., Fokina N.V., Vasilyeva G.K. Bioremediation of contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic // *Microorganisms*, 2021, 9, №1722.
11. Semenyuk N.N. et al. Effect of activated charcoal on bioremediation of diesel fuel contaminated soil. *Microbiology*. 2014; 83(5):589–598.
12. Vasilyeva G., Kondrashina V., Strijakova E., Ortega-Calvo J.-J. Adsorptive bioremediation of soil highly contaminated with crude oil // *Science of the Total Environ.* 2020; 706, № 135739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135739>.
13. Vasilyeva G.K. Mikhedova E.E., Zinnatshina L.V., Strijakova E.R., Sushkova S.N., Ortega-Calvo J.-J. Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil // *Science of the Total Environment*. 2022; 850, №157952.
14. Vasilyeva G.K., Kondrashina V.S. Strijakova E.R., Pinsky D.L. Express-phytotest for choosing conditions and following process of soil remediation // *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 44:1–4. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00727-8>.

ЖИВОТНОВОДЧЕСКИЕ СТОКИ – ЦЕННОЕ ОРГАНИЧЕСКОЕ УДОБРЕНИЕ

Навольнева Е.В., Пойменов А.С.

*ФГБНУ «Белгородский ФАНЦ РАН», г. Белгород, Россия
NavEkaVika@gmail.com*

В сельскохозяйственном производстве области складывается серьёзная агроэкологическая проблема использования отходов животноводства.

Применение отходов животноводства, и в частности жидких стоков в качестве органических удобрений, среди специалистов этой сферы вызывает большую дискуссию. На территории Белгородской области работает большое количество животноводческих комплексов и птицефабрик, у которых образуется и накапливаются сотни тонн отходов животноводства. Именно они и являются ценнейшим органическим удобрением, которое лишь при умелом использовании благоприятствует воспроизводству плодородия почвы [1].

На этапе проектирования животноводческих комплексов уже должна предусматриваться система очистных сооружений, предусматривающая ряд действий: навозоудаление, накопление, обеззараживание, процесс транспортировки и непосредственно применение в почву. Также, помимо этого, на полях, где используются такого рода удобрения должен проводиться периодический мониторинг за состоянием основных показателей плодородия почвы и окружающей средой в целом [2].

Свиноводческие стоки, навоз крупного рогатого скота и птичий помёт, имеют в своём составе большое количество макро-, мезо- и микроэлементов [3] (табл. 1). За счёт их применения улучшаются физические, физико-химические и агрохимические свойства почвы, то есть повышается её плодородие и как следствие обеспечивается рост урожайности сельскохозяйственных культур.

К сожалению, научно-необоснованное применение жидких стоков способно привести к неблагоприятным последствиям – способны загрязняться не только почвы, но и грунтовые воды, реки, что негативно сказывается и на здоровье человека. В том

случае, когда стоки вносят в больших количествах на поверхность почвы, образуется большая концентрация солей и тяжёлых металлов, которые по своему содержанию начинают превышать предельно допустимые концентрации. Накопленные токсические вещества по почвенному профилю опускаются в грунтовые воды и смываются в реки.

Таблица 1. Процентное содержание питательных веществ в свином бесподстилочном жидком навозе

Вещество	Содержание, %
Сухое	8-10
Органическое	4-7
Азот	0,15-0,35
Фосфор	0,12-0,14
Калий	0,14-0,27
Кальций	0,20-0,26
Магний	0,04-0,06
Натрий	0,04-0,08
pНсол.	6,3-6,8

Является недопустимым попадание в пруды-накопители (хранилища для навозных стоков) кислой воды, смешанной с серной кислотой, растворы которых очень часто используют при промывании гидросооружений.

В одном из предприятий Белгородского района, при нарушении технологии применения жидких животноводческих стоков, в кормовом севообороте, из-за постоянного переувлажнения почвенного покрова – агротехнические работы стало затруднительно проводить, а возделываемые сельскохозяйственные культур не формировали ожидаемый урожай. При проведении исследовательской работы было выявлено, что верхний

слой почвы переувлажнён из-за избыточного применения жидких стоков. С глубины 40 см начинается вязкая глеевая масса. Благодаря высокой минерализации стоков отмечено заболачивание почвы.

В химическом составе применяемых стоков зафиксировано большое количество солей (4248 мг/л – в 3 раза больше допустимых значений). Качественная характеристика солей показала преобладающее количество токсичных для культур солей натрия (900 мг/л). Из анионов преобладали гидрокарбонаты (1403 мг/л), карбонатов было 660 мг/л. В связи с вышесказанным, в почве образовывались легкорастворимые и токсичные соли для развития культур. Что способствовало редкой растительности на данной территории.

Однако, есть и противоположно направленные результаты использования животноводческих отходов, которые являются положительным примером их применения. В многолетних исследованиях другого предприятия Белгородского района, изучались физико-химические и агрохимические свойства чернозёма типичного (почва, которая наиболее распространена на территории Белгородской области).

Исследования показали, что в пахотном слое содержание гумуса увеличилось на 0,26 абсолютных процента, обменная кислотность изменилась в тенденциозном направлении в сторону подщелачивания. Также отмечен рост суммы поглощённых оснований – на 3 ммоль/100 г почвы (преобладали катионы кальция). За счёт использования свиных стоков произошёл рост содержания основных питательных элементов, так содержание легкогидролизуемого азота выросло на 61 мг/кг, содержание подвижного фосфора – на 143 мг/кг, а содержание подвижного калия – на 60 мг/кг почвы, что свидетельствует о положительном влиянии и росте плодородия почвы за счёт применения такого рода органических удобрений. За счёт положительного эффекта удобрений на основной компонент агроэкосистемы – почвы, отмечался и значительный рост урожайности возделываемых сельскохозяйственных культур, так зелёной массы многолетних трав получали около 60 т/га, кукурузы на силос – 80 т/га, кормовой свёклы – 100 т/га.

Во время использования свиноводческих стоков в качестве удобрений, нужно чёткое соблюдение севооборотов. В связи с этим в рассматриваемом хозяйстве были предусмотрены два

севооборота: 1. Озимая пшеница; кукуруза на зерно; ячмень и горох. 2. Озимая пшеница; кормовая свёкла; кукуруза на силос; ячмень с подсевом трав; многолетние травы 1 года пользования; многолетние травы 2 года пользования.

Дозы внесения животноводческих стоков в хозяйстве рассчитывались балансовым методом, то есть на запланированную урожайность вносили такое количество питательных элементов, которое необходимо растению с возвратом эквивалентного количества в почву при его выносе для воспроизводства плодородия почвы. Экономически и энергетически научно-обоснованной дозой внесения является 100-150 м³/га площади, что соответствует примерно 200-300 кг азота.

С целью эффективного применения такого рода животноводческих отходов в виде органических удобрений, сохранения плодородия почв и в целом окружающей среды необходимо соблюдение ряда определённых условий.

В первую очередь территория применения животноводческих стоков, должна характеризоваться высокой культурой земледелия, которая основана на использовании научно-обоснованных оптимальных доз внесения свиноводческих стоков. Во вторую очередь должны соблюдаться все требования агротехнологии возделывания той или иной культуры.

Не рекомендуется применение жидких свиных стоков на почвах, которые имеют щелочную реакцию среды (чернозёмы солонцеватые), так как они будут способствовать ещё большему выщелачиванию и ухудшению водного и воздушного режимов почвы. Максимально подходящими для такого вида удобрений являются почвы с кислой реакцией среды (серые лесные почвы или как отмечено в изучаемом хозяйстве – чернозёмы типичные). Также при использовании жидких стоков нужно учесть уровень залегания грунтовых вод, который должен быть не менее 3 м.

Технология применения жидких животноводческих стоков должна обеспечить расслоение данных отходов на фракции, для дальнейшего их использования в качестве органических удобрений. Важной составляющей технологии является не превышение нормы использования – в пределах 300 кг азота годовая норма.

Уборку культур следует проводить минимум через две недели после применения данного удобрения. Обязательно должны

соблюдаться требования по охране труда и здоровья работников с периодическим медицинским освидетельствованием.

При использовании отходов производства продукции животноводства (стоков навозных, помёта птичьего и компостов) в качестве органических удобрений необходимо соблюдать Технологические регламенты, в которых прописаны ОСТы и ТУ на используемые отходы в виде удобрений.

На территориях, где применяются животноводческие стоки нужно периодическое проведение мониторингов в-первую очередь за состоянием плодородия почв и продуктивностью сельскохозяйственных культур, при этом в обязательном порядке включать сведения о загрязнении почв тяжёлыми металлами, нитратным азотом, патогенными микроорганизмами, гельминтами.

И резюмируя всё вышеизложенное, можно констатировать, что животноводческие стоки при научно обоснованном их использовании являются ценным органическим удобрением.

Литература

1. Баранников В.Д. Охрана окружающей среды в зоне промышленного животноводства / В.Д. Баранников. – М.: Россельхозиздат, 1985. – 118 с.
1. Васильев В.А. Применение бесподстилочного навоза для удобрения / В.А. Васильев, М.Н. Швецов. – М.: Колос, 1983. – 172 с.
2. Тютюнов С.И., Соловиченко В.Д., Навольнева Е.В. Использование свиных стоков в качестве органических удобрений // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2015, №10 – с. 76-79

ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ ПОЧВЫ НЕФТЬЮ

Нестеркина Д.Д., Голубев Д.М., Брызгун В.Е.

*Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н. Г. Чернышевского, биологический факультет,
Саратов, Россия
nesterkina.darya@yandex.ru*

Почва – это биологически активное окружение, в котором взаимодействуют органические и неорганические компоненты. Изменения в почвенных сообществах могут отразиться серьезными последствиями как для микроорганизмов, так и для всей экосистемы. Загрязнение почвы углеводородами из-за разливов нефти стало глобальной проблемой, особенно в нефтедобывающих регионах [1]. Хроническое загрязнение почв нефтью может привести к снижению качества почвенных ресурсов и ухудшению условий для существования флоры и фауны [2]. В связи с этим, изучение взаимодействия микробных сообществ в почвах необходимо для понимания механизмов сохранения и восстановления биологической активности почв, загрязненных нефтью [3].

Бактерии являются важным компонентом микробного мира почвы и играют ключевую роль в процессах биodeградации нефтепродуктов. Исследования показали, что достаточная доля бактерий способна разлагать нефть на компоненты, которые могут утилизироваться в качестве питательных веществ для растений и других живых организмов [4]. Однако, постоянное воздействие нефтепродуктов может оказывать негативное влияние на почвенные бактериальные сообщества [5]. Изучение видового разнообразия бактерий в почвах, загрязненных нефтью, является важным шагом для формулирования мер по биоремедиации с использованием бактерий. Это может быть достигнуто путем определения чувствительности бактерий к загрязнению их микрoэкологической среды и понимания механизмов адаптации бактерий к нефтепестицидам. Кроме того, данные исследования помогут определить перспективные виды бактерий для использования в биоремедиации нефтезагрязненных почв.

Целью исследования являлся анализ видового разнообразия почв, загрязненных нефтью.

Работа выполнена на базе кафедры микробиологии и физиологии растений Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского.

Объектом исследования являлись темно-каштановые почвы, пробы которых отбирали с земельных участков сельскохозяйственного назначения с хроническим нефтяным загрязнением, расположенных на северо-западе от с. Новокировка (Саратовская область, Советский район).

Бактерии были выделены путём метода последовательных разведений почвенной вытяжки и ее высевом на плотные питательные среды [6, 7]. Для изоляции гетеротрофных бактерий почвенную суспензию высевали на ГРМ-агар, углеводород-окисляющих бактерий использовали среду М9, в которой качестве единственного источника углерода присутствовало вазелиновое масло. Посевы инкубировали в термостате при температуре +28⁰С в течение 2-4 суток.

Для выделения чистых культур отбирали изолированные колонии микроорганизмов и отсеивали их на скошенный агар.

Идентификацию штаммов микроорганизмов проводили с помощью изучения морфологических, культуральных и биохимических свойств с использованием определителя бактерий Берджи.

В результате микробиологического анализа образцов нефтезагрязненной почвы было идентифицировано 14 штаммов микроорганизмов, принадлежащим к 3 родам:

Bacillus pumilus, *B. muralis*, *B. cereus*, *B. amylooliguofaciens*, *B. circulans*, *B. firmus*, *B. simplex*, *B. megaterium*, *B. polymyxa*, *B. pumilus*, *Paenibacillus glucanolyticus*, *P. polymyxa*, *Pseudomonas mendocina*, *P. putida*, *P. proteolytica*.

Большая часть выделенных бактерий (11 видов) принадлежала к роду *Bacillus*. По данным литературы, в связи с тем, что представители этого рода имеют способность к спорообразованию, они обладают высокой степенью устойчивости к воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды, имеют мощную ферментативную систему, которая позволяет утилизировать широкий спектр органических субстратов, вовлекая их в свои метаболические процессы [8]. Это объясняет то, почему

именно бактерии этого рода наиболее разнообразны в почвах с хроническим загрязнением нефтью. Также были выделены 2 вида рода *Paenibacillus* и 3 вида рода *Pseudomonas* (рис. 1). Представители этих родов отличаются высокой устойчивостью к загрязнению нефтью [9].

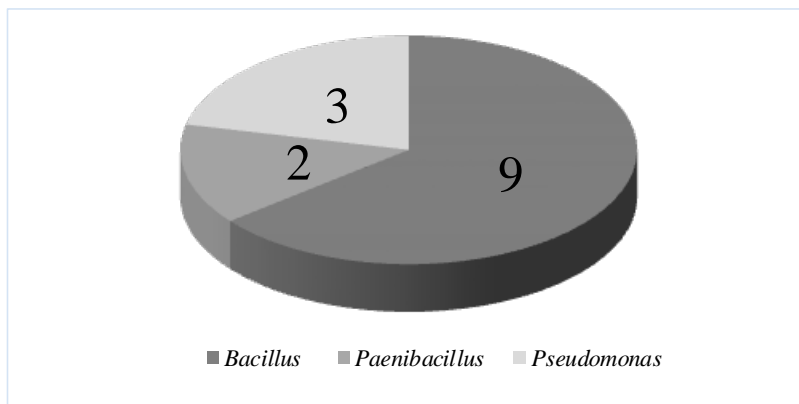


Рисунок 1. Соотношение видов микроорганизмов, выделенных из проб почвы с хроническим нефтяным загрязнением

Изолированные представители родов *Bacillus*, *Paenibacillus* и *Pseudomonas* являются важными компонентами растительно-микробных симбиозов и осуществляют процессы круговоротов различных элементов [10].

Некоторые виды бактерий рода *Bacillus*, такие как *B. subtilis*, *B. firmus* и *B. pumilus*, относятся к числу наиболее распространенных и важных почвенных видов, способных к синтезу различных полезных соединений, таких как антибиотики и ферменты. Также стоит отметить, что ряд видов, таких, например, как *P. glucanolyticus*, *B. muralis* могут играть важную роль в деградации органических веществ в почве. Эти микроорганизмы могут использоваться в биотехнологических процессах биоразложения органических материалов и восстановления экологического равновесия в почвах, зараженных химическими загрязнителями [10].

Таким образом, исследование видового разнообразия микроорганизмов почв с хроническим нефтяным загрязнением имеет практическое применение для разработки биотехнологических процессов очистки почв от загрязнений.

Литература

1. Gagliano M.C., Domenico A., Franzetti A. Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soils: Theoretical and Methodological Issues and Sustainable Development // Sustainability, 2018. № 10, p. 1162.
2. Semple K.T., Doick K.J., Wick L.Y., Harms H. Microbial interactions with organic contaminants in soil: Definitions, processes and measurement // Environmental Pollution, 2007. № 150(3), p. 166 - 176.
3. Ventorino V., Caputo R. The bioremediation potential of different bacterial genera for diesel fuel degradation // Journal of Environmental Management, 2015. № 152, p. 83 - 91.
4. Wong J.W.C., Selvam A., Zhao Z. The fate of crude oil and its associated chemicals in soil: A review of soil-oil interactions and remediation through microbial involvement // Science of the Total Environment, 2019. № 670, p. 793 - 818.
5. Idongesit A.V., Ebuana O.I. The biochemical mechanisms of petroleum degradation by bacteria // International Journal of Scientific and Engineering Research, 2020. № 11(7), p. 1258 - 1275.
6. Коробейникова А.С., Мурзина Ю.И., Глинская Е.В., Нечаева О.В. Физиологические группы микроорганизмов, выделенные из почвы с территории полигона (с. Колонтаево, Московская область) // Всероссийская научно-практическая конференция «Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения» 27-29 октября 2021 г., Саратов: СГУ, 2021. С. 56 - 57.
7. Нетрусов А.И., Егорова М.А., Захарчук Л.М. Практикум по микробиологии. М.: Академия, 2005. 608 с.
8. Buescher J.M., Liebermeister W. *Bacillus subtilis*: from soil bacterium to super-secreting cell factory // Microbial Cell Factories, 2018. № 17 (1), p. 1 - 15.
9. Aparna A., Srinikethan G. Effect of additional biosurfactant produced by *Pseudomonas* spp. on biodegradation of crude oil // Biomed Research International, 2015. № 6, p. 71 - 75.
10. Adetunji A.T., Lewu F.B. Diversity and abundance of bacteria communities in soil contaminated with hydrocarbons: A review // Brazilian Journal of Microbiology, 2020. № 51(1), p. 1 - 12.
11. Kim J.K., Lee Y.B., Kim M.K. *Paenibacillus* spp. as sources of adjuvants for plant growth promotion // Microbiological Research, 2017. № 205, p. 98 - 105.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕЛИОРАНТОВ ДЛЯ РЕМЕДИАЦИИ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ (ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)

Перебасова П.М., Авдулов Д.А., Ковалева Е.И.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
katekov@mail.ru*

За время освоения Арктической зоны в результате многолетнего техногенного воздействия на тундровые экосистемы ландшафтов наблюдается изменение компонентов природной среды, в том числе почв. Изменения почв носят как механический, так и химический характер, в виде привноса загрязняющих веществ, которые формируют новый антропогенный региональный фон по содержанию тех или иных химических веществ. Поэтому важным является изучение свойств почв Арктической зоны, видов загрязнителей почв, их поведения в почвах, а также разработка эффективных экологически безопасных технологий ремедиации. Естественное восстановление загрязненных почв требует десятки лет, поэтому целесообразным является использование различных методов восстановления загрязненных земель. Особое значение имеет разработка способов снижения токсичности металлов, перевода их в неподвижное состояние в почвах. Это проблема остается актуальной, несмотря на многочисленные сведения в литературе. Отсутствует широкая практика проведения рекультивационных работ в подобных условиях.

Цель работы - сравнение химической способности мелиорантов связывать металлы и переводить их в малоподвижное состояние; экологической оценке токсичности загрязненных почв металлами, обработанными мелиорантами, по сравнению с контрольными вариантами почв. В задачи исследования входило: выбор мелиорантов, расчёт вносимых доз, постановка модельного эксперимента, определение содержания валовых, подвижных и водорастворимых форм тяжелых металлов (никеля и меди) в исходных образцах и после обработки, а также определение фитотоксичности.

Объектами исследования послужили разные по генезису и условиям формирования почвы южной тундры. В лабораторном эксперименте использованы: глеезем криометаморфический; торфяно-глеезем потечно-гумусовый; подбур иллювиально-гумусовый. Название почв приведено согласно [4].

Для снижения подвижности загрязняющих веществ в почвах применялись как углеродные сорбенты (биочар, шунгит), так и минеральные сорбенты (глауконит, диатомит, глауконит, бентонит). Шунгит - некристаллический минералогидроабииогенного происхождения, состоящий в основном из углерода. Биочар представлял древесный уголь. Глауконит - это минерал из группы железо-калиевых филлосиликатов (слюды). Диатомит - кремнистые отложения, осадочная горная порода белого, состоящая более чем на 50% из панцирей диатомей. Диатомит и глауконит использовались в виде порошка, в то время как шунгит использовался в гранулированном виде с размером зерен ≤ 2 мм. Образцы мелиорантов (биочара) измельчали, просеивали через сито толщиной 2 мм для получения однородной текстуры перед их использованием в почвах.

В почвы вносились мелиоранты: биочар (доза Д1 и Д2), лигногумат (дозы Д1 и Д2); а также шунгит, диатомит; глауконит; бентонит в трех дозах (Д) - 0,5Д (Д1), 1Д (Д2), 2Д (Д3) согласно принятой схеме. Таким образом, составлен ряд для каждой почвы с 2 или 3 дозами для каждого вида мелиоранта, а также вариант почвы без его внесения, который служил контролем. В почву вручную вносились различные дозы мелиоранта, основываясь на характеристиках мелиорантов, на экспертном заключении об их возможной сорбционной способности, предлагаемых нормах использования производителем, с учетом содержания влаги в почве.

В исходных образцах почв определяли рН водный [1], влажность [2], потеря при прокаливании (ППП) [3]. Валовое содержание никеля и меди, содержание их подвижных форм в аммонийно-ацетатном буфере (рН 4,8) и водорастворимые формы (водные вытяжки в соотношении почва:вода как 1:10) определены методом масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой на приборе PlasmaQuant MS Elite. Фитотестирование проводилось путём высаживания семян овса и кресс-салата в чашках Петри в почву, на которую уложен фильтр «белая лента» в трех повторностях. Контролем служила почва, необработанная

мелиорантами. По результатам проращивания семян, длины корней проведён расчёт величины эффекта торможения и оценена фитотоксичность почв.

Образец почвы из подстилично-торфяного горизонта глеезема криометаморфического характеризовался рН 6,2; ППП – 45,28%. Доля подвижных форм никеля составляла 1% от его общего содержания, тогда как меди – 9%; доля водорастворимого никеля и меди была незначительна – 0,5% и 0,1% соответственно.

Реакция среды подстилично-торфяного горизонта торфяно-глеезема близка к нейтральной (рН 6,8), ППП 57,65%. Доля подвижного никеля от валового содержания не превышала 1,5%, меди – 1%, водорастворимые формы отсутствовали.

Образец подбура, подстилично-торфяной горизонт, характеризовался кислой реакцией среды (рН 4,9), ППП – 33%. Доля подвижного никеля от валового составляла 36%, меди – 12%, водорастворимые формы никеля – 10% и меди – 2% от их валового содержания.

Добавление биочара во все почвы не носило направленный характер, в данной работе эффект снижения подвижности никеля и меди не выявлен, фитоэффект отсутствует.

Внесение лигногумата в образцы подбура иллювиально-гумусовый снижало долю как подвижных, так и водорастворимых форм никеля и меди. Наиболее эффективной была доза Д2: концентрации подвижных форм никеля и меди снижались до 20%, тогда как водорастворимых – до 60 и 85% соответственно.

Шунгит показал хорошие сорбционные свойства. В эксперименте при добавлении шунгита в образцы глеезема криометаморфического наблюдали снижение подвижности никеля при внесении Д1 на 62%, Д2 – 60% и Д3 58%; меди на 65% при добавлении Д1, 65% - Д2, 64% - Д3. Концентрации водорастворимых форм никеля снижались в 2 раза при внесении Д1 шунгита, и незначительно - при внесении Д2 и Д3. Отмечено снижение водорастворимых форм меди при внесении Д1 на 22%, Д2 – 20%, а добавление Д3 не вызывало эффекта. Оценка фитотоксичности почв не показала наибольшего эффекта с этим мелиорантом, что, вероятно, связано с его свойствами прочно сорбировать не только металлы, но и питательные вещества, которые переходят в недоступные формы.

Внесение диатомита в модельные образцы глеезема криометаморфического снижало подвижность: никеля на 55% при дозе Д1, 52 % - Д2; 67% - Д3; меди на 70% - Д1, 63% -Д2, 70% -Д3. Установлено снижение доли водорастворимых форм: никеля на 30% и 35% при добавлении Д1 и Д2, и на 20% при Д3; и меди - на 64% при внесении диатомита в дозе Д1, 57% - дозы Д2, 40% - дозы Д3.

Глауконит, как мелиорант, показал возможность снижения подвижности как никеля, так и меди: его добавление снижало подвижность никеля от 58 до 64 %; меди – от 66 до 72%, наибольший эффект отмечен при внесении Д3. Снижение концентрации водорастворимых металлов не превышало 15% при внесении глауконита.

Добавка бентонита снижала подвижность никеля (доза Д1 - 33%, Д2 - 6%, Д3 - 4%); меди (Д1 - 41%, Д2 - 25%, Д3 - 8%). Внесение сухого бентонита приводила к значительному его набуханию во влажной почве, что требует дополнительных исследований. Вероятно, целесообразно провести исследования по применению бентонита в виде суспензии.

Мелиорант и его присутствие в почве может быть экологически безопасным и экономически эффективным в случае:

- 1) отсутствия негативного воздействия мелиоранта и сорбированных загрязняющих веществ на компоненты природной среды;
- 2) экологичности;
- 3) эффективности при выполнении основного назначения – сорбции загрязняющего вещества;
- 4) оптимальной сметной стоимости реализации очистки почв относительно других способов ремедиации.

Таким образом, показана наибольшая эффективность применения диатомита как мелиоранта в одной дозе для снижения подвижности металлов в почвах, загрязнённых тяжёлыми металлами. Применение данного мелиоранта в указанных количествах не оказывает негативного влияния на компоненты природной среды, что подтверждается результатами фитотестирования. Установлена эффективность применения лигногумата для кислых почв, загрязненных медью и никелем, в одной дозе.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы

Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды»; государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800147-0 «Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов»).

Литература

1. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.
2. ГОСТ 28268-89 Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений.
3. ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества.
4. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004.

ВОЗМОЖНОСТИ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ПЛАНШЕТНОГО ФИТОТЕСТИРОВАНИЯ

*Прудникова Е.В., Шулаков А.Ю., Славиогло В.Д.,
Калита М.М., Воронина Л.П., Морачевская Е.В.,
Терехова В.А.*

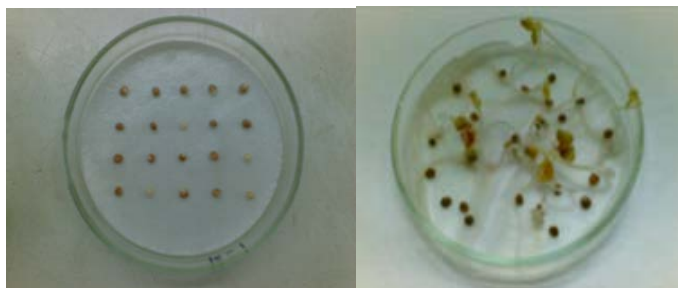
*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
eva.pr@mail.ru*

Биотестирование с использованием высших растений широко применяется для определения как фитостимулирующего воздействия, так и для установления токсичности [1-3]. Особенно востребованы фитотесты при исследовании почв, поскольку одна из важнейших функций почв состоит в обеспечении роста и развития растений. Учет результатов фитотестов проводят по разным показателям, но как правило учитывают всхожесть семян, энергию прорастания растений, длину корней, ростков у проростков семян. Набор анализируемых параметров может включать разнообразные сочетания тест-параметров и тест-растений. Известны и широко используются в зависимости от целей несколько стандартных методов, регламентирующих применение определенных видов растений и измеряемых тест-функций [3-5].

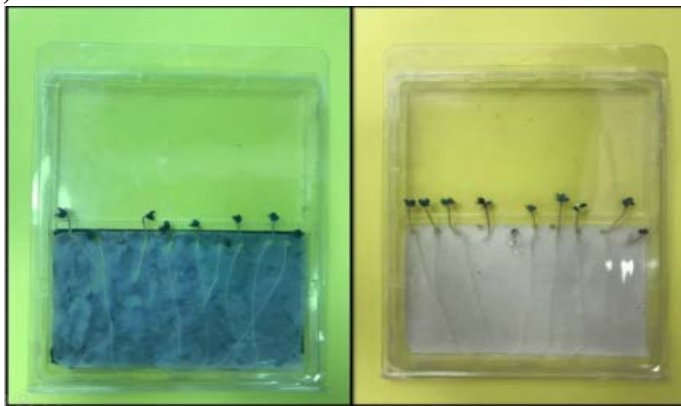
В зависимости от масштаба и цели заложенного эксперимента, выделяют лабораторный, вегетационный (в сосудах) и микроделяночный (на экспериментальных площадках) способы фитотестирования. В зависимости от времени проведения эксперимента выделяют острые фитотесты, которые длятся 24-96 ч, и хронические фитотесты, которые длятся от 7 сут и до стадии цветения или созревания семян в контрольных вариантах. Как правило, в вегетационных и микроделяночных экспериментах проводят оценку хронической фитотоксичности, а в лабораторных – острой фитотоксичности [4]. В контролируемых условиях в качестве тест-растений для определения острой фитотоксичности наиболее часто используются овёс посевной, горчица белая, редька масличная, кресс-салат. В литературе немало примеров удачного использования и других видов растений (ГОСТ 32627-2014).

Анализ ростовых тест-функций растений можно проводить как при проращивании в анализируемой почве (аппликатный способ), так и в водных экстрактах из почвенного образца (элюатный способ).

Фитотестирование острой токсичности аппликатным и элюатным способами можно проводить как в чашках Петри (рис. 1а), так и другим способом - в пластиковых одноразовых планшетах – в тест-системе ФИТОСКАН (рис. 1б).



а)



б)

Рисунок 1. Варианты фитотестирования проб: (а) - в чашках Петри и (б) в планшетах

Фитотестирование в планшетах имеет ряд преимуществ по сравнению с чашками Петри, в которых корни растений переплетаются, ломаются при извлечении, внося тем самым дополнительные погрешности измерений [4]. Результаты развития проростков в планшетах можно фиксировать сканированием и

обрабатывать с помощью анализаторов видеоизображений на компьютере, чего нельзя сделать при фитотестировании в чашках Петри. В настоящее время производство пластиковых планшетов организовано компанией ООО «Европолитест» (<https://europolytest.ru/>), специализирующейся на разработке и внедрении оборудования и приборов для биотестирования.

С учетом специфики исследований существуют рекомендации к выбору тест-растений для биотестирования экологического состояния почв. Однако в целом, предпочтение отдается эндемичным видам однодольных растений в сочетании с двудольными, с мелкими семенами, физиологические особенности которых позволяют раньше реагировать на внешние воздействия. В методиках планшетного фитотестирования Фитоскан - ФР.1.31.2012.11560 «Методика измерений биологической активности гуминовых веществ методом фитотестирования», и Фитоскан-2 ФР.1.31.2020.38716 «Методика измерений биологической активности почв, субстратов растений, гуминовых веществ методом биотестирования», например, в качестве стандартизированных тест-культур используют представителей однодольных – овёс посевной (*Avena sativa* L.) и двудольных – горчицу белую (*Sinapis alba* L.) и редьку посевную (*Raphanus sativus* L.).

При выборе формы проведения фитотестирования отдают предпочтение варианту анализа субстрата в твердом виде [6], а не водным экстрактам, так как существует большое количество нерастворимых загрязняющих веществ (в частности, нефтепродукты). Кроме того, в зависимости от типа почв, в экстракты переходит разное количество поллютантов. Вместе с тем, в ряде случаев целесообразно проводить сравнительную оценку результатов фитотестирования элюатным и аппликатным способом, чтобы представлять степень миграции опасных веществ в почве и водных средах.

Проанализируем результаты проведенной ранее экспериментальной работы [5] с целью сопоставления разных способов фитотестирования для оценки загрязнения почв тяжелыми металлами и ремедиационного эффекта углеродсодержащих препаратов.

В эксперименте использовали почву с двух полей УОПЭЦ МГУ «Чашниково» (Московская область, Солнечногорский район) с общим названием «агродерново-подзолистая глееватая глубокопахотная глубокооглеенная тяжелосуглинистая, подстилаемая мо-

реной». Почвы в три раза различались по содержанию органического вещества: S1 с содержанием гумуса 6,65% - сильно гумусированная, S2 с содержанием гумуса 2,24% - слабо гумусированная. Исследование проведено в экспериментах с моделированием смешанного загрязнения почвенных образцов солями тяжелых металлов (ТМ) по 5 ОДК Cu, и Pb, согласно ГН 2.1.7.2511-09.

Для выявления ремедирующего эффекта препаратов в эксперименте использовали:

- лигногумат калия (Л), полученный искусственной гумификацией лигносульфоната, (производитель НПО «РЭТ», Россия), зольность составляла 40%, содержание С, N, H, S и К – 37,3, 0,5, 3,72, 4,84 и 9,0% соответственно; C/N=134,7, рНCaCl₂ - 9 (1% раствор), содержание гуминовых кислот - 58% от органического вещества; лигногумат хорошо растворим в воде, вносили в почву в виде водного раствора, массовая доля – 0,25%;

- биочар (Б), произведенный пиролизом древесины березы, фракции 2-8 мм, (производитель ООО «Метаком», Россия), содержал углерод (88,2%), N, H и S (0,44, 0,82 и 0,19% соответственно), золу (2,8%), воду (3%); рНCaCl₂ - 8,9, отношение C/N=21,4. Содержание катионов Cu, Zn и Pb в биочаре не более 0,02% его массы; добавляли в дозе 5% от массы почвенного образца.

Изучали влияние лигногумата и биочара в отдельности и при совместном действии. Оценивали острую фитотоксичность с помощью семян горчицы белой *Sinapis alba* L., аппликатным и элюатным методами, согласно Методики измерения биологической активности гуминовых веществ методом фитотестирования - «Фитоскан». Методика внесена в реестр Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений, код регистрации ФР.1.31.2012.11560.

При аппликатном фитотестировании увлажненную (60 % от полной влагоемкости) почву массой 60 г помещали в нижнюю камеру пластикового двухкамерного планшета, укрывали фильтровальной бумагой, на которую раскладывали по 10 шт. семян в каждый планшет. При элюатном способе фитотестирования оценивали эффект водной вытяжки (элюата) из почвенных образцов, приготовленной стандартным способом в соотношении почва: вода – 1:4. В этом случае в нижнюю камеру пластикового планшета помещали фильтровальную бумагу, пропитанную водной вытяжкой (8 мл в каждый планшет). Каждый вариант имел трехкратную повторность. Планшеты выдерживали при

температуре $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ в течение 96 часов. По окончании экспозиции у проростков семян регистрировали длину корней (в мм). Контролем служили проростки семян, развивающиеся в планшетах на увлажненной дистиллированной водой фильтровальной бумаге и контрольном образце почвы. Статистическая обработка данных проводилась в программе MS Excel 2013.

Эффекты воздействия ТМ в слабо и сильно гумусированной почве элюатным и аппликатным способами сильно различались. Средние значения длины корней в вариантах ТМ(S1) и ТМ (S2) при анализе элюатным способом были сходными, тогда как при анализе аппликатным способом различия зависели от содержания гумуса в почве и составляли более 50% (рис. 2).

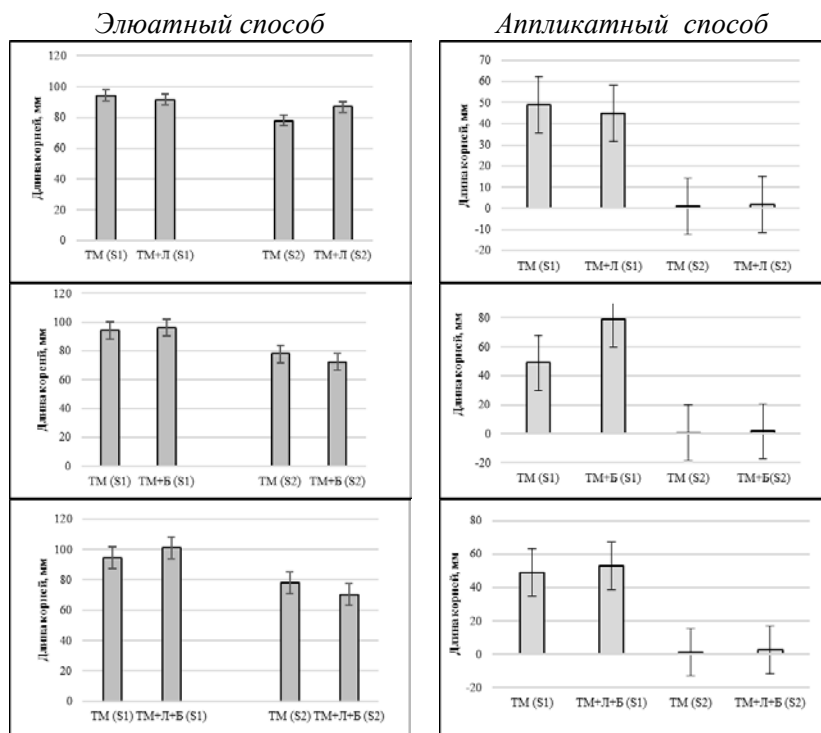


Рисунок 2. Влияние лигногумата на длину корней *S. alba* в загрязненных ТМ образцах сильно (S1) и слабо (S2) гумусированной почвы по данным элюатного фитотестирования (слева) и аппликатного фитотестирования (справа).

Влияние обработки лигногуматом и биочаром на развитие растений в загрязненных солями ТМ почвах разной гумусированности (S1 и S2) тоже в сильной степени различалось. Этот эффект наблюдался при применении препаратов в отдельности и в совместно.

Важно подчеркнуть, что при этом в вариантах опыта с использованием водной вытяжки эти различия были не столь ярко выражены по сравнению с использованием почвы для наполнения планшетов (рис. 2). Сравним данные о влиянии лигногумата и биочара, полученные двумя способами, подробнее.

Элюатный способ.

Результаты тестирования свидетельствуют, что лигногумат в загрязненной ТМ слабо гумусированной почве снижает фитотоксичность на 12%. Использование же биочара не отразилось достоверно на изменении фитотоксичности, проявлялась лишь тенденция к ингибированию длины корней (на 8%). Совместное применение биочара и лигногумата в слабо гумусированной почве также приводило к слабому ингибированию роста корней тест-растения (на 11%).

Апplikатный способ.

Лигногумат, добавленный к слабо гумусированной почве, по результатам анализа твердой массы почвы на фоне сильного подавления роста растений ТМ обнаружил довольно высокий процент стимуляции роста корней *S. alba* - на 77%.

Биочар в аппликатном фитотесте, как в одной, так и в другой почве, стимулировал рост корней: в образцах S1 - на 62%, в образцах с поля S2 – на 78%. Хотя эти значения в абсолютном значении были невысоки и малозаметны на фоне действия токсикантов в слабо гумусированной почве.

При совместном применении лигногумата и биочара небольшой стимулирующий эффект аппликатным способом отмечен в обеих почвах.

Подытоживая, можно говорить, что применение планшетного способа тестирования в системе «Фитоскан» информативно и дает хорошую возможность экспрессной оценки острой фитотоксичности двумя способами - элюатным и аппликатным. Сравнение экспериментальных данных, полученных при анализе непосредственно почвенных образцов и водных их вытяжек показывает, что предпочтение в выборе только одного способа анализа не всегда оправдано. Эффекты воздействия биочара и

лигногумата на развитие растений при оценке элюатным и аппликационным способами не были однонаправленными. Для полноты представлений о качестве и механизмах воздействия препаратов, применяемых для ремедиации почв в относительно небольших дозах, целесообразно применять оба способа.

Финансирование. Работа по оценке ремедиационных эффектов поддержана грантом РФФ 22-24-00666.

Литература

1. Bünemann E.K., Bongiorno G., Baic Z., Creamer R., Deyn G., Goedeb R., Fleskens L., Geissend L., Kuypers T., Mäder P., Pulleman M., Sikkink W., van Groenigen W., Brussaard L. Soil quality – A critical review // *Soil Biology and Biochemistry*, 2018. N 120. P.105–125.
2. Терехова В.А., Кулачкова С.А., Морачевская Е.В., Кирюшина А.П. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор). *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение* 78, 2 (2023), 35–45 .
3. Terekhova V.A., Fedoseeva E.V., Panova M.I., Chukov, S.N. Bioassay of humic products as potential remedies: A review. // *Eurasian Soil Science*. 55, 7 (2022), 868–878.
4. Николаева О.В., Терехова В.А. Совершенствование лабораторного фитотестирования для экотоксикологической оценки почв // *Почвоведение*. 2017. № 9. С. 1141–1152.
5. Воронина Л.П., Поногайбо К.Э. Подход к выбору методов фитотестирования для исследования почв. *Агрохимия*. 9 (2021), 75–79.
6. Terekhova V.A., Prudnikova E.V., Kiryushina A.P., Karpukhin M.M., Plekhanova I.O., Yakimenko O.S. Phytotoxicity of heavy metals in contaminated podzolic soils of different fertility levels. // *Eurasian Soil Science* 54, 6 (2021), 964–974.
7. Prudnikova E.V., Neaman A., Terekhova V.A., Karpukhin M.M., Vorobeichik E.L., Smorkalov I.A., Dovletyarova E.A., Navarro-Villarreal K., Ginocchio R., Peñalosa P. Root elongation method for the quality assessment of metal-polluted soils: Whole soil or soil-water extract? // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 20 (2020), 2294–2303.

MODERN TECHNOLOGIES FOR ADSORPTION BASED INDUSTRIAL WATER REMEDIATION

Rajput P., Sushkova S., Mandzhieva S., Soldatov A.

*Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, Russia
priyadarshanirajput22@gmail.com*

The water quality is affecting or polluting by multiple biotic-abiotic factors; especially presence of toxic elements such as heavy metals that has deleterious effects on humans and animals' health. Thus, the monitoring of water quality is required special attention in each sector, including releases of industrial wastewater, which contains huge amount of toxic elements. Releases of wastewater in environment pollutes ground or surface water, and accumulate in soil, thus, the soil is becoming sink of these toxic elements that worsen its properties, resulted poor quality yield. Removal of pollutants from the industrial wastewater is a global issue, affecting millions of livelihoods directly/indirectly [1]. Therefore, there is an urgent need to develop an eco-friendly technology to eliminate toxic elements from wastewater. The present work aimed to integrate the modern laboratory methods and synchrotron based analytical approaches, using emerging adsorbents, and microfluidic technologies to optimize and enhance the sorption of toxic elements from synthetic and industrial water [2]. The series of experiments were performed at The Smart Materials Research Institute and Academy of Biology and Biotechnology of the Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russia) and at Synchrotron Research Centre (NRC), Kurchatov Institute (Moscow, Russia). The mixtures of various adsorbents, i.e., zeolite-Y, zeolite-ferrierite, activated carbon and biochar's were combined in different fractions degenerated according to IHS scheme (Improved Latin Hypercube Sampling Method) to achieve most efficient mixture (Fig. 1). Our own laboratory synthesized metal organic framework (MOF), i.e., UiO-66-NH₂ was used in this study to adsorb toxic elements with the combination of above-mentioned adsorbents. The mixture of efficient sorbents was filled inside the microtubes and closed both open ends by quartz wool, considered as a filter, and connected with an automated microfluidic device with the controlled flow rate [3].

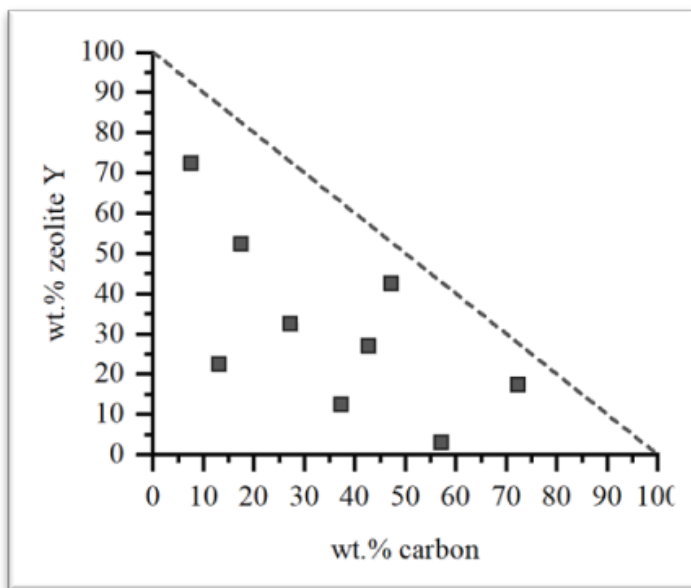


Figure 1. Weight fractions of sorbents generate according to IHS scheme

The filtered water samples were analyzed by atomic absorption spectrometry (AAS) and using conductivity device ex-situ/in-situ mode. Both, AAS and conductivity analysis results showed a bigger fraction of zeolite-Y which worsen the performance of Pb adsorption. At the same time, bigger fraction of coconut charcoal performed worse for Ni, while for MOF: UiO-66-NH₂, it was vice-versa. For Zn, coconut charcoal showed significant performance, and for Cu and Cd, charcoal performed better than MOF: UiO-66-NH₂. All mixtures performed well for Pb ion adsorption. The spatial distribution of elements performed by X-ray fluorescence in the used filters showed higher concentration of ions at the edges of filters, explained by the different flow rate due to the friction from the microtube walls. XANES data indicated Pb²⁺ as the most abundant species in the used filters.

The low-cost microfluidic setup worked successfully for water filtration of polluted water. Thus, the repeated number of experiments were conducted to standardized technique. The X-ray based techniques, namely XANES and XRF provided the exact oxidation

state of Pb, as a most abundant elements in industrial wastewater. The special distribution of the adsorbed ions in the used filters (Fig. 2), which is important for optimizing the filter composition and geometry for realistic implementation showed expected results. The UV–Vis spectrometry were applied in experiment to produce rapid results online and offline mode.

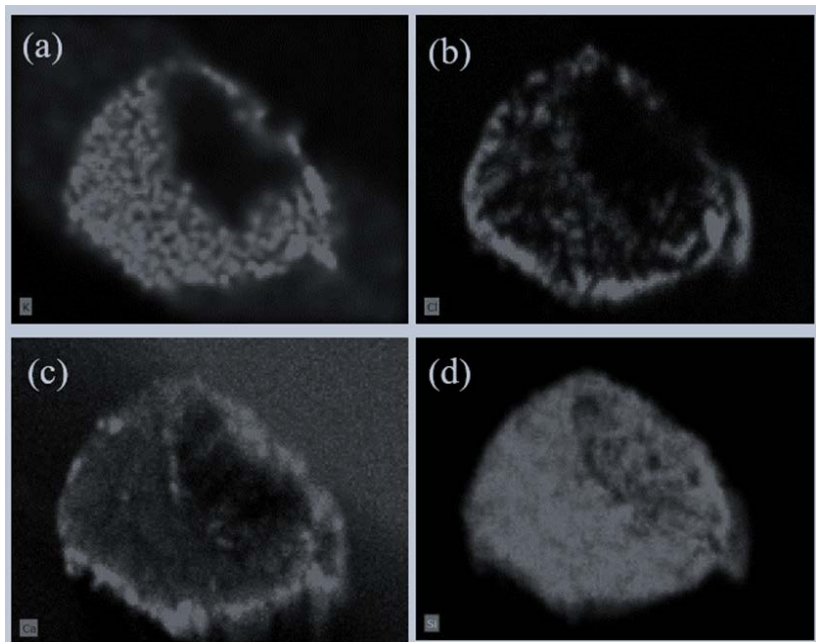


Figure 2. Spatial distribution of chemical elements in the used filters by XRF

This is low cost and precise technology to detect and eliminate water contaminants, rapidly and precisely. With the mass control, time control as well as concentration control of model and industrial wastewater, 3D microfluidic chip dimension control parameters, experiments revealed high efficiency of 3D printed microfluidic chip and enhanced adsorption capacity of sorbents to remove heavy metal ions. However, more attention is required to using efficient adsorbent combinations, *in situ/ex situ* application, testing on various types of wastewaters and level of concentration, development of efficient automatic filtration chambers, novel microfluidic chips, integrated use

of modern techniques and standardization of various sorbents in eco-friendly, cost-effective, and sustainable way [4, 5]. Further, the efficient fractions of sorbents could be integrated with metal NPs, tolerant microbes or enable to form biofilms for more effective water remediation.

Acknowledgements: The study was carried out in the laboratory "Soil Health" of the Southern Federal University with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement no. 075-15-2022-1122.

Литература

1. Qasem, N. A. A. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater: A Comprehensive and Critical Review' / N. A. A. Qasem, R. H. Mohammed, D. U. Lawal // npj Clean Water. – 2011 – Vol. 4 (1). - № 36.
2. Santana, H. S. Review on Microfluidic Device Applications for Fluids Separation and Water Treatment Processes / H. S. Santana, J. L. Silva, B. Aghel, J. Ortega-Casanova // SN Applied Sciences. – 2022. – Vol. 59 2 (3). - № 395.
3. Wang, T. Microfluidics for Environmental Applications / T. Wang, C. Yu, X. Xie // Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology. – 2022b. – Vol. 179. - P. 267-290.
https://doi.org/10.1007/10_2020_128.
4. Wang, B. Selective heavy metal removal and water purification by microfluidically generated chitosan microspheres: Characteristics, modeling and application / B. Wang, Z. Bai, H. Jiang, P. Prinsen, R. Luque, S. Zhao, J. Xuan // Journal of Hazardous Materials. – 2019. – Vol. 364. – P. 192–205.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.024>.
5. Tazawa, H. Development of microfluidic devices for on-site water quality testing using glass molding process / H. Tazawa, T. Sato, Y. Sakuta, R. Miyake // Analytical Sciences. - 2023.
<https://doi.org/10.1007/s44211-023-00335-3>.

ПРИЕМЫ СНИЖЕНИЯ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННУЮ ПРОДУКЦИЮ

Разенков И.В., Волкова Е.С.

*Ульяновский государственный аграрный университет
имени П.А. Столыпина, факультет агротехнологий, земельных
ресурсов и пищевых производств, Ульяновск, Россия
federiko276@mail.ru, volkova-ivinaelena@yandex.ru*

Тяжелые металлы относятся преимущественно к рассеянным химическим элементам, поэтому загрязнению ими подвергается земная поверхность, в частности, почвенный покров и гидросфера, а также атмосфера. В силу этого повышение их концентрации в окружающей среде вследствие естественного или антропогенного поступления может носить глобальный характер. Токсичность тяжелых металлов связана с их физико-химическими свойствами, со способностью к образованию прочных соединений с рядом функциональных групп на поверхности и внутри клеток. Симптомы «отравления» растений тяжелыми металлами внешне проявляются в замедлении их роста и развития, изменении цвета и увядании листьев, уродливости и недоразвитости корневой системы. Как итог - частичная, а иногда и полная утрата почвенного плодородия [1, 2, 3, 4].

Существует ряд приемов снижения поступления тяжелых металлов в растения, в том числе сельскохозяйственную продукцию. Одним из таких приемов могут быть применение природных высококремнистых пород (диатомитов, цеолитов, бентонитов) в качестве сорбентов и известкование почв.

Природные цеолиты являются водными каркасными алюмосиликатами щелочных и щелочноземельных металлов с обобщенной эмпирической формулой: $M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot zH_2O$, где М-катион с валентностью n, z-число молекул воды, отношение $x:n$ имеет различные значения и обычно находится в пределах от 1 до 5. Кристаллическая решетка цеолитов построена кремнекислородными тетраэдрами. В результате такого строения во внутрикристаллическом пространстве цеолитов образуется система соединенных между собой и с окружающей средой

пор, в которой располагаются обменные катионы кальция и натрия, реже калия, магния и молекулы «цеолитной» воды, в связи с чем они способны улавливать и удерживать при внесении в почву воду, также и различные элементы (в том числе загрязняющие и токсичные и тем самым снизить поступления в растения) [5, 6].

В последнее время известкование, первоначально направленное на устранение почвенной кислотности, приобретает все большее значение для уменьшения мобильности, биологической доступности и токсичности тяжелых металлов в загрязненных почвах. Количество известкового материала, необходимое для регулирования почвенной кислотности зависит от его кислотно-нейтрализующей эффективности и буферной способности почв. Связывание тяжелых металлов в почвах при известковании происходит в процессах их осаждения в виде карбонатов, увеличения специфической и неспецифической адсорбции при повышении значений рН и поглощения в микробной биомассе при активизации деятельности микроорганизмов в условиях близкой к нейтральной или нейтральной реакции среды. При этом уменьшение поглощения растениями тяжелых металлов обусловлено как их закреплением в почвах, так и конкуренцией с кальцием [7]. Известкование признано наиболее эффективным приемом снижения подвижности тяжелых металлов в почве и улучшения качества растениеводческой продукции.

В настоящее время существует два типа стратегии ремедиации загрязненных почв. Одна направлена на уменьшение валового содержания поллютантов в почвах до максимально допустимого уровня, другая на сокращение мобильности и биологической доступности поллютантов [8, 9].

В наших исследованиях приведены методы «мягкой» ремедиации почв путем снижения подвижности поллютантов.

Цель исследования – изучить приемы снижения подвижности тяжелых металлов в почвах и поступления их в растительную продукцию.

Исследования проведены в ООО «Абушаев» Ульяновского района Ульяновской области путем закладки и проведения полевого опыта с использованием в качестве приемов снижения подвижности тяжелых металлов в почвах и тем самым – поступление их в растительную продукцию известкованием и внесением в почву высококремнистой породы – цеолита.

В качестве известкового материала использовали фильтрационный осадок АО «Ульяновский сахарный завод». Фильтрационный осадок образуется при очистке свекловичного сока путем добавления к нему фильтрационного раствора. В связи с этим он может содержать до 70-80% углекислого кальция и углекислого магния (в перерасчете на сухое вещество). Фильтрационный осадок, использованный при проведении опытов, содержал $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ 43,8%. Цеолит Юшанского месторождения Ульяновской области содержит до 60 % диоксида кремния, в том числе до 30 % аморфного. Кремниевые кислоты способны переводить подвижные формы тяжелых металлов в недоступную форму.

Схема полевого опыта состояла из 5-и вариантов по следующей схеме:

- контроль – без удобрений и мелиоранта,
- внесение фильтрационного осадка (CaCO_3) в дозе 4,5 т/га,
- внесение фильтрационного осадка (CaCO_3) в дозе 6,1 т/га,
- внесение цеолита природного в дозе 4,5 т/га,
- внесение цеолита природного в дозе 6,1 т/га.

Почва опытного поля – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый с содержанием гумуса по Тюрину (в модификации ЦИНАО) – 6,9 %, подвижного фосфора (P_2O_5 по Чирикову) – 95 мг/кг, обменного калия (K_2O по Чирикову) – 128 мг/кг, серы – 5,6 мг/кг; рН КСl – 5,22, Нг – 6,65 ммоль/100 г, Са – 22,0 ммоль/100 г, Mg – 4,87 ммоль/100 г, Cu – 5,2 мг/кг, Mn – 20,8 мг/кг, Zn – 0,42 мг/кг почвы, сумма поглощенных оснований – 46,1 ммоль/100 г. Содержание солей тяжелых металлов в валовой и подвижной формах не превышало ПДК ни одного элемента.

Общая площадь делянки составляла 88 м² (11 × 8 м), учетная – 54 м² (9 × 6 м), соответственно, общая площадь одной повторности – 264 м², всего опытного участка – 1056 м².

Анализы почвенных образцов проведены в аккредитованной лаборатории анализа почв и агрохимикатов ФГБУ САС «Ульяновская» по соответствующим методикам: *(РД – Руководящий документ):

- определение валовой формы тяжелых металлов почве РД 52.18.191-2018;
- определение подвижной формы тяжелых металлов в почве РД 52.18.289-1990;
- определение тяжелых металлов в растениях ГОСТ 30178-1996.

В таблице 1 приведено содержание тяжелых металлов в почве опытного поля. В таблице 2 в зерне озимой пшеницы, выращенной вопыте.

Таблица 1. Содержание подвижной формы тяжелых металлов в почве опытного участка по вариантам, мг/кг

Варианты	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni
Контроль	0,40	0,04	0,063	0,38	0,55
Внесение CaCO ₃ в дозе 4,5т/га	0,33	0,02	0,034	0,31	0,46
Внесение CaCO ₃ в дозе 6,1т/га	0,21	0,02	0,027	0,28	0,42
Внесение цеолита природного в дозе 4,5 т/га	0,29	0,02	0,036	0,34	0,45
Внесение цеолита природного в дозе 6,1 т/га	0,22	0,02	0,028	0,30	0,42
НСР ₀₅	0,04	0,02	0,01	0,04	0,04

Данные приведенные в таблице убедительно доказывают значительное снижение подвижности тяжелых металлов в почве опытного участка. Так, в 2022 году снижение содержания подвижных соединений свинца в почве в зависимости от дозы внесения фильтрационного осадка составила 17,5 (доза 4,5 т/га) и 47,5% (доза 6,1 т/га), кадмия – 50%, меди 46,0 и 57,1 %, цинка 18,4 и 26,3%, никеля 16,3 и 23,6%. Следовательно, известкование почвы является действенным приемом снижения подвижности тяжелых металлов в почвах: по отдельным металлам подвижность их уменьшается до 50% и более. Последнее обеспечивает получение более безопасной сельскохозяйственной продукции. Внесение цеолита также достоверно снижало подвижность тяжелых металлов в почвах опытного участка. Содержание свинца стало ниже на 28% при внесении цеолита в дозе 4,5 т/га и 45% в дозе 6,1 т/га, кадмия на 50%, меди на 42-56%, цинка на 10-21%, никель на 18-24% соответственно.

Так, накопление в зерне пшеницы при внесении в почву фильтрационного осадка уменьшилось: свинца на 14,3% (доза

известкового материала 4,5 т/га) и 32% (доза 6,1 т/га), никеля – на 14 и 18%, кадмия – на 6,7 и 13,4%, меди – на 9 и 13,3%, цинка – на 7,4 и 10,1%.

Таблица 2. Содержание подвижной формы тяжелых металлов в зерне озимой пшеницы по вариантам, мг/кг

Варианты	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni
Контроль	0,28	0,060	1,88	21,6	0,22
Внесение CaCO ₃ в дозе 4,5т/га	0,24	0,056	1,71	20,0	0,19
Внесение CaCO ₃ в дозе 6,1т/га	0,19	0,052	1,63	19,4	0,18
Внесение цеолита природного в дозе 4,5 т/га	0,26	0,054	1,64	19,8	0,17
Внесение цеолита природного в дозе 6,1 т/га	0,21	0,050	1,61	19,8	0,15
ПДК	5,0	0,3	30,0	50,0	3,0

В зерне озимой пшеницы при внесении в почву цеолита природного накопление свинца уменьшилось на 7,3 (доза 4,5 т/га) и 25% (доза 6,1 т/га), меди – на 12,7 и 14,3%, цинка – на 8,4%, никеля – на 22,7 и 31,8%, кадмия - на 10 и 16,7%.

Как видно из приведенных данных, снижение подвижности и поступления тяжелых металлов зависит от дозы детоксикантов: чем больше доза, тем больше снижается подвижность токсичных тяжелых металлов и поступление их в сельскохозяйственную продукцию.

Таким образом, использование фильтрационного осадка и цеолита природного, в качестве детоксиканта тяжелых металлов показало высокую их эффективность. При этом снижение подвижности их при внесении в почву в дозе 4,5 т/га - от 10 до 50%, в дозе 6,1 т/га - от 23 до 57%. Соответственно, поступление тяжелых металлов в растительную продукцию уменьшилось в среднем на 16%.

Литература

1. Сенченко М.А. Тяжёлые металлы и микроэлементы в системе «почва - растение - продукт переработки растения» / М.А. Сенченко // Вестник АПК Верхневолжья. – 2021. – № 1 (53). – С. 13-18.
2. Бускунова Г.Г. Тяжелые металлы в системе «почва-дикорастущее лекарственное растение» на примере TANACETUM VULGARE L / Г.Г. Бускунова, Р.Ф. Хасанова, И.Н. Семенова, Г.Р. Ильбулова // Экология и промышленность России. – 2020. – № 24 (7). – С. 37-41.
3. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва-растение / В.Б. Ильин. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1991. – 148 с.
4. Медведев И.Ф. Тяжелые металлы в экосистемах/ И.Ф. Медведев, С.С. Деревягин. Саратов: Ракурс, 2017. – 178 с.
5. Donald, W. Breck. Цеолитовые молекулярные сита / W. Breck Donald. Перевод с английского. Мир, Москва, 1976. 781 с.
6. Самсонова, Н.Е. Кремний в растительных и животных организмах / Н.Е. Самсонова // Агрохимия. – 2019. – № 7. – С. 86-96.
7. Bolan N.S., Duraisamy V.P. Role of inorganic and organic soil amendments on immobilization and phytoavailability of heavy metals: a review involving specific case studies // Aust. J. Soil Res. 2003. V. 41. P. 533–555.
8. Lombi E., Hamon R.E. Remediation of polluted soils // Encyclopedia of Soils in the Environment / Editor in Chief: Daniel Hillel. Oxford: Elsevier Ltd, 2005. P. 379–385
9. Копчик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) / Г.Н. Копчик // Почвоведение. – 2014. – № 7. – С. 851-868.

**ВЛИЯНИЕ ТОРФОГЕЛЯ
НА ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ, ЗАГРЯЗНЕННОЙ
ОТРАБОТАННЫМ МОТОРНЫМ МАСЛОМ
(ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ)**

Расчетнова Д.О.

*Всероссийский научно-исследовательский и технологический
институт биологической промышленности.
Лаборатория бактериальных препаратов. пос. БиокOMBината,
г. Лосино-Петровский, Московская область, Россия
dashenciya_m@mail.ru*

Приведенные в статье данные показывают эффективность использования торфогеля для снижения токсичности дерново-подзолистой почвы, загрязненной отработанным моторным маслом в лабораторных условиях. Фитотестирование показало, что при 2% загрязнении почвы, при добавлении 10% торфогеля, токсичность снижается в разы по сравнению с естественным течением биodeградации в загрязненных образцах без добавления торфогеля. Сделаны выводы о том, что торфогель оказывает положительное влияние на процесс биodeградации, значительно его ускоряя.

Нефтяная промышленность играет значительную роль в развитии научно-технического прогресса, но следует также учитывать, что нефть и ее продукты с каждым годом все шире используются в различных отраслях промышленности. Очевидно, что нефть также оказывает решающее влияние на экономику отдельных секторов и страны в целом. Наряду с этим, продукты нефтепереработки и способы их эксплуатации, транспортировки и утилизации оказывают негативное воздействие на окружающую среду, в том числе на почву, попадая в нее тем или иным способом. Наиболее тяжелым и вредным загрязнителем для почвы среди нефтепродуктов являются отработанные горючесмазочные материалы (ГСМ) из-за их физических и химикотоксикологических свойств. Отработанные моторные масла наиболее распространены среди загрязнителей из ГСМ, мешают поступлению влаги и кислорода к корням растений, а также оказывают токсическое воздействие из-за наличия в их составе продуктов окисления и др. [1, 2].

Выявить и зафиксировать загрязнение, оценить влияние загрязнителя на почву можно достаточно простым и быстрым способом фитотестирования. Фитотестирование – это метод, основанный на использовании растений для изучения процессов очистки почв от нефтепродуктов. Он имеет ряд преимуществ и может быть полезным инструментом при оценке эффективности различных методов биоремедиации, также является важным инструментом при изучении очистки почв от нефтепродуктов. Оно сочетает в себе экологическую, экономическую и информационную эффективность.

Торфогель представляет собой концентрированный гель, содержащий гуминовые и фульвовые кислоты с добавлением калия и является одним из инструментов для очистки почвы от нефтепродуктов, снижая токсическое воздействие на растения и микроорганизмы.

Цель работы – выявить и оценить экотоксикологические эффекты экспериментального загрязнения почв автомобильными моторными маслами с помощью стандартного лабораторного тест-объекта – семена растения двудольного горчицы белой (*Sinapis alba* L.).

Для лабораторного эксперимента был использован образец дерново-подзолистой почвы на супесях и легких суглинках (ООПТ «Сосновые леса на песчаных дюнах», г.о. Воскресенск, Московская обл.); отобранный осенью 2022 г. в природных условиях в местах с отсутствием значимых источников техногенного загрязнения. Образец почвы был предварительно высушен до воздушно-сухого состояния, очищен от примесей растений и инородных материалов, просеян через сито.

В качестве химического загрязнителя был взят образец отработанного автомобильного моторного масла со станций технического обслуживания автомобильной техники. Загрязнитель добавляли непосредственно в подготовленную почву в концентрации 20 г/кг с перемешиванием и последующей выдержкой в течение суток при комнатной температуре.

В качестве сорбента-очистителя был использован торфогель «Рекульт Актив» (препарат соответствует ТУ 08.92.10-001-44295752-2020), который вводился в часть испытуемых образцов непосредственно перед проведением фитотестирования в концентрации 100 г/кг с последующим перемешиванием.

Тест-объектом выступали семена двудольного растения горчицы *Sinapis alba* L. одинакового размера и формы. Семена отобранных растений в количестве 10 шт. в трех повторностях размещали на равном расстоянии друг от друга поверх увлажненной почвы.

В рамках тестирования были использованы плоские и мелкие прозрачные вертикальные планшеты, состоящие из двух частей, таким образом, чтобы почва была увлажнена на протяжении всего эксперимента, одновременно аэрируясь на протяжении всего эксперимента.

Почву увлажняли дистиллированной водой. После закрытия планшетов прозрачными крышками, планшеты вертикально помещали в климатостат и выдерживали при температуре 25⁰С в течение 72-часов при естественном освещении.

По прошествии 72-часов фиксировалось количество проросших семян и длину корней тест-растений в исследуемой почве и контрольной почве.

В конце проращивания длина каждого корня и ростка, была измерена напрямую линейкой и зафиксирована.

По прошествии двух, четырех, шести, восьми, десяти недель фитотестирование повторяли, отбирая почву из тех же самых обработанных загрязненных образцов и контрольной почвы. Четыре образца для фитотестирования были приготовлены единожды в первый день проведения эксперимента, помещены в климатостат, где были поддержаны определенные условия температуры, увлажнения, освещения на протяжении всего эксперимента.

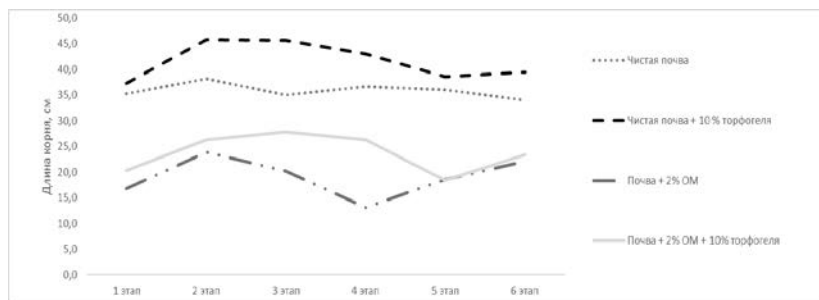


Рисунок 1. Сравнительные данные средних значений длин корней по 6 этапам фитотестирования по каждому из 4-х образцов почв

Угнетение роста и уменьшение длины корней зафиксированы во всех образцах, содержащих отработанное моторное масло, по сравнению с чистым образцом почвы, и образцом, содержащим только торфогель. Наибольшее отрицательное воздействие выявлено в образце № 4 (рис. 1), состав которого советует почве и 2% загрязнению отработанным моторным маслом. Наилучший результат показал образец № 2 (рис. 1), содержащий почву и 10% торфогеля. На протяжении всех этапов эксперимента данный образец показал наивысшую плодovitость.

Первый этап эксперимента проводился непосредственно сразу после внесения торфогеля, значения соответствуют 72-часовому проращиванию (табл. 1).

Таблица 1. Аналитические данные на 1 этапе эксперимента по фитотестированию из почв/отложений, загрязненных моторными маслами в концентрации 20 г/кг с добавлением торфогеля 100г/кг

№	Состав образца	1 этап	
		Среднее число проросших семян, шт	Средняя длина проросших семян, см
1	Чистая почва (контроль)	10	35,3
2	Чистая почва + 10 % торфогеля	9	37,3
3	Почва + 2% ОМ	9	16,8
4	Почва + 2% ОМ + 10% торфогеля	9	20,3

Второй этап эксперимента проводился через 2 недели после добавления торфогеля, статистические данные соответствуют значениям 72-часовому проращиванию после отбора почвы из заранее приготовленных образцов (табл. 2).

Третий этап эксперимента проводился через 4 недели после добавления торфогеля, статистические данные соответствуют значениям 72-часовому проращиванию (табл. 3).

Четвертый, пятый и шестой этапы эксперимента проводились через 6, 8, 10 недель соответственно после добавления торфогеля, статистические данные соответствуют значениям 72-часовому проращиванию после начала каждого из этапов (табл. 4, 5, 6).

Таблица 2. Аналитические данные на 2 этапе эксперимента по фитотестированию из почв/отложений, загрязненных моторными маслами в концентрации 20 г/кг с добавлением торфогеля 100г/кг

№	Состав образца	2 этап	
		Среднее число проросших семян, шт.	Средняя длина проросших семян, см
1	Чистая почва (контроль)	10	38,1
2	Чистая почва + 10 % торфогеля	10	45,8
3	Почва + 2% ОМ	8	23,9
4	Почва + 2% ОМ + 10% торфогеля	9	26,3

Таблица 3. Аналитические данные на 3 этапе эксперимента по фитотестированию из почв/отложений, загрязненных моторными маслами в концентрации 20 г/кг с добавлением торфогеля 100г/кг

№	Состав образца	3 этап	
		Среднее число проросших семян, шт.	Средняя длина проросших семян, см
1	Чистая почва (контроль)	10	35,1
2	Чистая почва + 10 % торфогеля	10	45,6
3	Почва + 2% ОМ	6	20,3
4	Почва + 2% ОМ + 10% торфогеля	7	27,9

Образец с добавлением торфогеля №3 показал лучшие результаты по среднему значению длины корня, относительно аналогичного образца №4, без добавления торфогеля. Так же образец № 2, относительно контрольного образца чистой почвы № 1 показал лучшие результаты проращиваемости (рис.1).

В результате показано, что наибольшим токсическим эффектом для проростков семян обладают образцы дерново-подзолистой почвы, загрязненной отработанным моторным маслом в концентрации 20 г/кг. Более выраженный негативный эффект воздействия отработанного моторного масла отмечен при

загрязнении дерново-подзолистой почвы без добавления торфогеля. Эффект, вероятно, связан с тем, что в составе присутствуют химические соединения продуктов высокотемпературного окисления углеводов, которые могут быть более токсичными для растений [3].

Таблица 4. Аналитические данные на 4 этапе эксперимента по фитотестированию из почв/отложений, загрязненных моторными маслами в концентрации 20 г/кг с добавлением торфогеля 100 г/кг

№	Состав образца	4 этап	
		Среднее число проросших семян, шт.	Средняя длина проросших семян, см
1	Чистая почва (контроль)	10	36,6
2	Чистая почва + 10 % торфогеля	9	43,0
3	Почва + 2% ОМ	5	13,1
4	Почва + 2% ОМ + 10% торфогеля	8	26,3

Таблица 5. Аналитические данные на 5 этапе эксперимента по фитотестированию из почв/отложений, загрязненных моторными маслами в концентрации 20 г/кг с добавлением торфогеля 100 г/кг

№	Состав образца	5 этап	
		Среднее число проросших семян, шт.	Средняя длина проросших семян, см
1	Чистая почва (контроль)	10	36,0
2	Чистая почва + 10 % торфогеля	10	38,6
3	Почва + 2% ОМ	6	18,5
4	Почва + 2% ОМ + 10% торфогеля	7	18,4

Помимо продуктов окисления, в отработанном моторном масле содержатся полициклические ароматические углеводороды, являющиеся общепризнанными экотоксикантами с мутагенной активностью [4, 5]. Известно также, что полициклические

ароматические углеводороды могут угнетать фотосинтез у растений [6], в том числе и у планктонных водорослей в определенных условиях освещения [7]. Стимулирующий эффект прорастания в образцах с торфогелем обусловлен наличием в образце гуминовых и фульвовых кислот с добавлением калия [8].

Таблица 6. Аналитические данные на 6 этапе эксперимента по фитотестированию из почв/отложений, загрязненных моторными маслами в концентрации 20 г/кг с добавлением торфогеля 100 г/кг

№	Состав образца	6 этап	
		Среднее число проросших семян, шт.	Средняя длина проросших семян, см
1	Чистая почва (контроль)	10	34,0
2	Чистая почва + 10 % торфогеля	9	39,5
3	Почва + 2% ОМ	5	22,1
4	Почва + 2% ОМ + 10% торфогеля	8	23,3

В ходе проведения лабораторного эксперимента с использованием торфогеля удалось снизить негативное воздействие загрязнителя на 24% за 10 недель при концентрации торфогеля 10% от массы загрязненной почвы. В результате исследования была показана высокая эффективность влияния торфогеля на экотоксикологические свойства дерново-подзолистой почвы, загрязненной отработанным моторным маслом.

Литература

1. Середина В.П., Андреева Т.А., Алексеева Т.П., Бурмистрова Т.И., Терещенко Н.Н. Нефтезагрязненные почвы: свойства и рекультивация. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 270 с.
2. Namkoong W., Hwang E.Y., Park J.S., Choi J.Y. Bioremediation of diesel-contaminated soil with composting // Environ. Pollut. 2002. Vol. 119. P. 23–31.
3. Расчетнова Д.О., Котегов Б.Г., Павленко И.В., Еремец В.И. Эко-токсикологическая оценка почв, загрязненных моторными маслами в лабораторных условиях, с использованием культуры микроводорослей. Бутлеровские сообщения. 2023. Т. 73. №1. С. 109-115.

4. Granella M., Clonfero E. The mutagenic activity and polycyclic aromatic hydrocarbon content of mineral oils. // *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 1991. Vol. 63. No.2. P. 149-153.
5. Clonfero E., Nardini B., Marchioro M., Bordin A., Gabbani G. Mutagenicity and contents of polycyclic aromatic hydrocarbons in used and recycled motor oils. // *Mutation Research*. 1996. Vol. 368. No. 3-4. P. 283-291.
6. Ланкин А.В. Механизмы токсического действия полициклических ароматических углеводородов на фотосинтетический аппарат. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук, ИФР РАН. Москва. 2016. 22с.
7. Marwood C.A., Smith R.E., Solomon K.R., Charlton M.N., Greenberg B.M.. Intact and photomodified polycyclic aromatic hydrocarbons inhibit photosynthesis in natural assemblages of Lake Erie phytoplankton exposed to solar radiation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1999. Vol. 44. No. 3. P. 322-327.
8. Адельфинская Е.А., Мязин В.А. Использование активированного торфа для рекультивации грунтов, загрязненных нефтепродуктами // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2020. Т. 28. No 2. С. 160–171.

ОЦЕНКА ДЕГИДРОГЕНАЗНОЙ АКТИВНОСТИ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННОГО ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ РЕМЕДИАЦИИ НИТРОАММОФОСКОЙ

Ревина С.Ю., Русева А.С., Минникова Т.В.

*Южный федеральный университет, Академия биологии
и биотехнологии, Ростов-на-Дону, Россия
soffy.sofff@mail.ru*

Нефть и нефтепродукты являются одними из крупномасштабных загрязнителей окружающей среды [6]. Загрязнение почв вследствие их высокой адсорбирующей способности представляет наибольшую опасность для обитающих в них живых организмов, так как возможно накопление большого количества вредных веществ. Кроме того, нефтяные углеводороды приводят к изменению физических, физико-химических и микробиологических свойств почв, что способствует потере их плодородия [1].

Почвенные ферменты катализируют специфические реакции, необходимые для восстановления загрязненных почв [8, 5]. Активность дегидрогеназ, в частности, отражает интенсивность минерализационных процессов в почве [3]. Известно, что наиболее сильное подавление ферментативной активности происходит при загрязнении почв нефтепромысловыми растворами, в составе которых содержатся высокие концентрации солей и тяжелых металлов, которые являются ингибиторами активности ферментов [4, 6].

Целью работы была оценка активности дегидрогеназ чернозема обыкновенного, загрязненного разными концентрациями нефти, при внесении нитроаммофоски.

В качестве объекта исследования был выбран чернозем обыкновенный карбонатный. Место отбора – пашня Ботанического сада Южного федерального университета. Образцы почв просушивали, просеивали через сито с диаметром ячеек 3,2 мм, в количестве 200 граммов помещали в вегетационные сосуды, увлажняли, загрязняли и вносили ремедиант. Для моделирования процесса загрязнения почвы использовали нефть в концентрациях 10, 25 и 50% от массы почвы. В качестве ремедианта нефтезагрязнения вносили нитроаммофоску из расчета 3,75 г на

1 кг почвы. Нитроаммофоска – это комплексное минеральное удобрение, содержащее азот, калий и фосфор в соотношении 15:15:15. Химическая формула: $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{KCl}$. После добавления нефти и нитроаммофоски образцы инкубировали в лабораторных условиях при оптимальной температуре (20–25°C) и увлажнении (40% от массы почвы) в течение 30 сут. При окончании срока инкубации в черноземе определяли активность дегидрогеназ по методу А.Ш. Галстяна. В качестве субстрата в данном методе используют 2.3.5-трифенилтетразолий хлористый (ТТХ), который восстанавливается в насыщенный красный цвет соединение формазана – трифенилформазан [2].

Исследование показало, что внесение нитроаммофоски в почву без загрязнителя оказывает стимулирующее воздействие на активность дегидрогеназ – происходит увеличение показателя на 61% относительно контроля. Загрязнение нефтью во всех вариантах способствует достоверному ингибированию ферментов на 66–72% при сравнении с контролем (рис. 1).

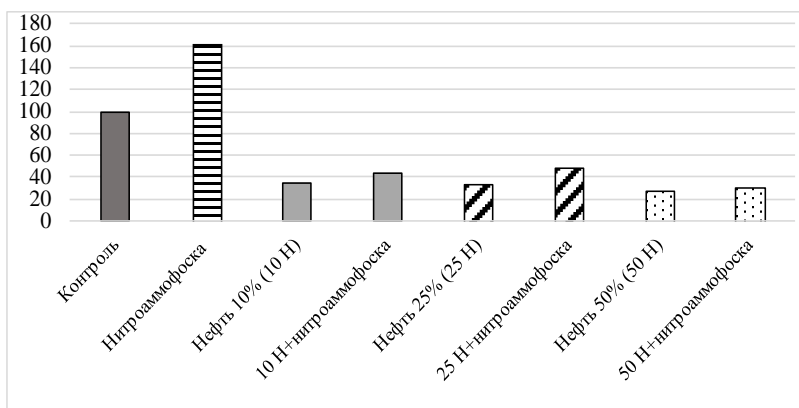


Рисунок 1. Изменение активности дегидрогеназ при внесении нитроаммофоски, % от контроля

Стимулирование активности дегидрогеназ установили при внесении нитроаммофоски в почву со всеми изучаемыми концентрациями нефти, при этом максимальное увеличение на 44% относительно фона было отмечено для концентрации нефти 25% от массы почвы. На дозах 10 и 50% повышение наблюдалось на 23 и 10% соответственно относительно фоновых значений (рис. 1)

Таким образом, загрязнение чернозема разными концентрациями нефти приводит к ингибированию активности дегидрогеназ. Нитроаммофоска способствует увеличению значений фермента. Наибольшее повышение активности дегидрогеназ на 44% относительно фона отмечено при внесении нитроаммофоски в почву с концентрацией нефти 25%.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента МК-175.2022.5 и при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России «Лаборатория молодых ученых» в рамках Межрегионального научно-образовательного центра Юга России (№ ЛабНОЦ-21-01АБ, FENW-2021-0014).

Литература

1. Исакова Е.А. Особенности воздействия нефти и нефтепродуктов на почвенную биоту // *Colloquium-journal*, 2019. – №. 12 (36). – С. 7–10.
2. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем: монография /; Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. 356 с.
3. Колесников С.И. Региональные нормативы содержания в почвах юга России тяжелых металлов, неметаллов, металлоидов, нефти и нефтепродуктов // *Энтузиасты аграрной науки*. – 2019. – С. 36–40.
4. Новоселова Е.И., Волкова О.О. Влияние моно- и полизагрязнения тяжелыми металлами на ферментативную активность почв // *Тез. Докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева*. Белгород. 2016. Ч. 1. С. 193-194.
5. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Почвенные ферменты и загрязнение почв: биodeградация, биоремедиация, биоиндикация // *Агрохимия*. – 2020. – №. 3. – С. 83-93.
6. Хазиев Ф. Х. Экологические связи ферментативной активности почв // *Экобиотех*. – 2018. – Т. 1. – №. 2. – С. 80-92.
7. Шкидченко А.Н., Ахметов Л.И., Андреев А.А. Влияние нефтепродуктов различной степени конденсации на гуминовый комплекс серой лесной почвы и рост растений // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. – 2018. – №. 3. – С. 80-90.
8. Rao M.A., Scelza R., Acevedo F., Diez M.C., Gianfreda L. Enzymes as useful tools for environmental purposes // *Chemosphere*. 2014. 107. P. 145–162.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ГЕНОВ АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНОСТИ В ПОЧВЕННЫХ МИКРОБИОМАХ - ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

Сазыкин И.С.
Приглашенный лектор

*Южный федеральный университет, Академия Биологии
и Биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Ростов-на-Дону,
Российская Федерация
issa@sfedu.ru*

Устойчивость к противомикробным препаратам является серьёзной проблемой общественного здравоохранения во всём мире. Широкое и всё более растущее использование антибиотиков и других противомикробных препаратов расширило разнообразие и распространение антибиотикорезистентных бактерий (АРБ) и генов резистентности к антибиотикам (АРГ). Загрязнение антропогенными отходами, которые содержат различные уровни антибиотиков и их метаболитов, АРБ и АРГ, рассматривается в качестве основного фактора, способствующего распространению АРГ. Роль антропогенной активности в распространённости АРБ и АРГ привела к введению термина «экологическая устойчивость к антибиотикам». В настоящее время АРГ считаются новым классом загрязнителей окружающей среды. Кроме сильного селективного отбора антибиотиками, АРГ также стали более распространёнными из-за антропогенного воздействия.

К сожалению, в России реальный мониторинг АРГ налажен лишь в крупных клиниках, а научные работы почти исключительно посвящены резистентности патогенных и условно-патогенных клинических штаммов. Исследования загрязнения окружающей среды генами лекарственной устойчивости, не говоря уже о систематическом мониторинге, практически отсутствуют. Важно, что степень загрязнения АРГ зависит не только от поступления в окружающую среду непосредственного загрязнителя – генов резистентности, но и от уровня загрязнения биотопов различными поллютантами. Крайне малоизученным вопросом в этой области остается влияние антропогенных пол-

лютантов (в частности, ПАУ) на распространение АРГ в природных микробиоценозах. Высокая гидрофобность и стабильная химическая структура обуславливают нерастворимость ПАУ, из-за чего они могут быстро сорбироваться органическим веществом почвы. Толерантные к ПАУ бактериальные изоляты из среды, подвергающейся сильному воздействию, часто проявляют также высокую устойчивость к металлам и антибиотикам.

Нами были проведены исследования распространения АРГ в микробиомах почв, находящихся под антропогенным давлением. Были исследованы почвы импактной зоны Новочеркасской ГРЭС, грунты полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО), техногенно-загрязненные почвы и почвы сельских населенных пунктов. В загрязненных почвах был отмечен рост содержания клинически релевантных АРГ. Максимальный рост АРГ выявлен в техногенно-загрязненной почве, куда поступали химические, но не биологические отходы.

Позднее была проведена гораздо более детальная оценка резистома и биодоступных ПАУ в почвах различного целевого назначения Ростовской области. В настоящее время признано, что биодоступность загрязнителя является более важным ключевым параметром, чем общая концентрация в почве / отложениях, для оценки воздействия на организм при оценке риска.

Всего было исследовано 7 генов устойчивости к антибиотикам: количество копий гена *VIM* колебалось от $1,82 \times 10^{-11}$ до $2,61 \times 10^{-4}$ / 16S рРНК; *VanB* – от $9,10 \times 10^{-11}$ до $1,05 \times 10^{-3}$ / 16S рРНК; *TetO3* – от $1,34 \times 10^{-10}$ до $1,22 \times 10^{-3}$ / 16S рРНК; *ErmB5* – от $7,35 \times 10^{-9}$ до $4,06 \times 10^{-5}$ / 16S рРНК; *sul2* – от $3,45 \times 10^{-12}$ до $2,98 \times 10^{-1}$ / 16S рРНК; *mphA* – от $3,99 \times 10^{-11}$ до $1,54 \times 10^{-1}$ / 16S рРНК; *aadA2* – от $6,93 \times 10^{-9}$ до $7,02 \times 10^{-1}$ / 16S рРНК.

В пробах почв особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Σ ПАУ варьировала от 58,8 до 97,3 нг/г почвы. В двух наиболее загрязненных пробах был зарегистрирован фенантрен в концентрациях 53,1 и 65,0 нг/г почвы. В пробах почв данного типа использования доминировали 3-кольцевые ПАУ (от 62,6 до 84,6%). В пробах почв ООПТ были обнаружены все исследуемые гены устойчивости к антибиотикам. Наибольшее суммарное количество копий целевых генов / копий 16S рРНК доходило до $4,48 \times 10^{-4}$ копий / 16S рРНК.

Для почв ООПТ была зарегистрирована положительная тесная корреляция между 3-кольцевыми ПАУ и генами *TetO* и *sul2*.

4-, 5-кольцевыми ПАУ и генами *VIM*, *mphA* и *aadA2*. 6-кольцевыми ПАУ и геном *ErmB5*.

ΣПАУ в почвах рекреационного назначения колебалась от 34,2 до 115,7 нг/г почвы. В пробах почв данного использования также доминируют 3-кольцевые ПАУ от 51,4 до 79,6%. В этих почвах также были обнаружены все исследуемые АРГ, а наибольшее количество АРГ составляло $3,54 \times 10^{-3}$ копий / 16S рРНК.

В образцах почв промышленного назначения доминировали 3-кольцевые ПАУ (от 58,8% до 85,0%). В данных почвах количество биодоступных ПАУ колебалось в пределах от 42,4 до 424,9 нг/г почвы. Максимальное суммарное количество копий АРГ в данном типе почв составило $3,79 \times 10^{-1}$ копий / 16S рРНК, хотя в данной пробе выявлено только 3 АРГ: *VIM*, *sul2* и *aadA2*.

Для почв рекреационного и промышленного назначения не было выявлено тесной положительной значимой корреляцией между содержанием биодоступных ПАУ и АРГ.

В почвах транспортной инфраструктуры количество биодоступных ПАУ колебалось в пределах от 43,9 до 183,9 нг/г. В данном типе почв доминировали 3-кольцевые ПАУ (67,6–84,1%). Максимальное суммарное количество АРГ в почвах транспортной инфраструктуры составило $7,04 \times 10^{-1}$ копий / 16S рРНК.

В почвах транспортной инфраструктуры положительную корреляцию наблюдали лишь между 2-кольцевыми ПАУ и генами *TetO* и *mphA*.

В почвах сельскохозяйственного назначения преобладали 3-кольцевые ПАУ в диапазоне от 45,1% до 80,1%. Также была высока доля 4-кольцевых ПАУ – от 29,7% до 40,3%. Доля 5-кольцевых ПАУ не превышала 10%, а 6-кольцевых – 5%. Количество биодоступных ПАУ в пробах сельскохозяйственных почв составляло от 36,8 и 449,0 нг/г. В почвах данного типа использования максимальное суммарное количество АРГ было $1,25 \times 10^{-3}$ копий / 16S рРНК.

Для почв сельскохозяйственного назначения выявлена тесная положительная корреляция для 3-, 5- и 6-кольцевых ПАУ с генами *VIM*, *ErmB5*, *mphA* и *aadA2*. А для 4-кольцевых – с генами *ErmB5*, *mphA* и *aadA2*.

Сумма биодоступных ПАУ в пробах почв больниц и отдельно стоящих амбулаторных зданий колебалась от 55,6 нг/г до

111,5 нг/г. В пробах этого типа почв доминировали 3-кольцевые ПАУ, их доля варьировала от 66,1% до 75,3%. Доля 2-кольцевых ПАУ доходила до 23,9%, а максимальная доля 5- и 6-кольцевых ПАУ была 5,6%. Ни в одной из проб почв этого типа использования не было обнаружено гена, кодирующего устойчивость к эритромицину *ermB5*, а максимальное суммарное количество АРГ составило $1,28 \times 10^{-3}$ копий / 16S рРНК.

В почвах больниц и отдельно стоящих амбулаторных зданий выявлена корреляция для 4-кольцевых ПАУ и генами *sul2*, 5-кольцевых ПАУ и генами *VIM*, *VanB* и *sul2*, а для 6-кольцевых ПАУ – *TetO* и *sul2*.

Сумма биодоступных ПАУ в пробах почв полигонов ТКО варьировала от 47,6 нг/г до 109,5 нг/г почвы. В данных почвах среди биодоступных ПАУ доминировали 3-кольцевые (до 81,6%). Наибольшая доля 2- и 4-кольцевых ПАУ доходила до 12,8%, а 5- и 6-кольцевых ПАУ до 4,2% и 1,6%, соответственно. В почвах полигонов ТКО максимальное суммарное количество АРГ было $1,04 \times 10^{-3}$ копий / 16S рРНК.

Для почв ТКО не была зарегистрирована тесная положительная корреляция между 2-6- кольцевыми ПАУ и содержанием АРГ. Однако была найдена корреляция между содержанием индивидуальных ПАУ – бифенила и бенз(б)флуорантена с генами *VanB*, *TetO*, *ErmB5*, *sul2*, *mphA*, *aadA2*.

Во всех изученных группах почв были обнаружены все исследуемые АРГ, кроме образцов территорий больниц и отдельно стоящих амбулаторных зданий, где нами не был обнаружен ген устойчивости к эритромицину (*ermB5*). По суммарному количеству копий АРГ / 16S рРНК можно построить следующий ряд исследуемых групп почв по уменьшению: почвы транспортной инфраструктуры > почвы промышленного назначения > почвы рекреационного назначения > почвы больниц и отдельно стоящих амбулаторных зданий > почвы сельскохозяйственного назначения > почвы полигонов ТКО > почвы ООПТ.

Почвы ООПТ (нетронутый микробиом) содержали самые низкие количества АРГ при максимально широком их спектре. Была установлена тесная положительная корреляция между загрязнением ПАУ с различным количеством ароматических колец и количественным содержанием определенных АРГ. Также установлена тесная положительная корреляция между содержанием бифенила и бенз(б)флуорантена с индивидуальными АРГ.

Каким образом ПАУ могут приводить к усилению горизонтального переноса АРГ? Увеличение уровня горизонтального переноса генов происходит за счет усиления процессов конъюгации и трансформации в микробиоме, опосредованном окислительным стрессом и активацией SOS-, RpoS- и RpoE- регулонов (рис. 1).

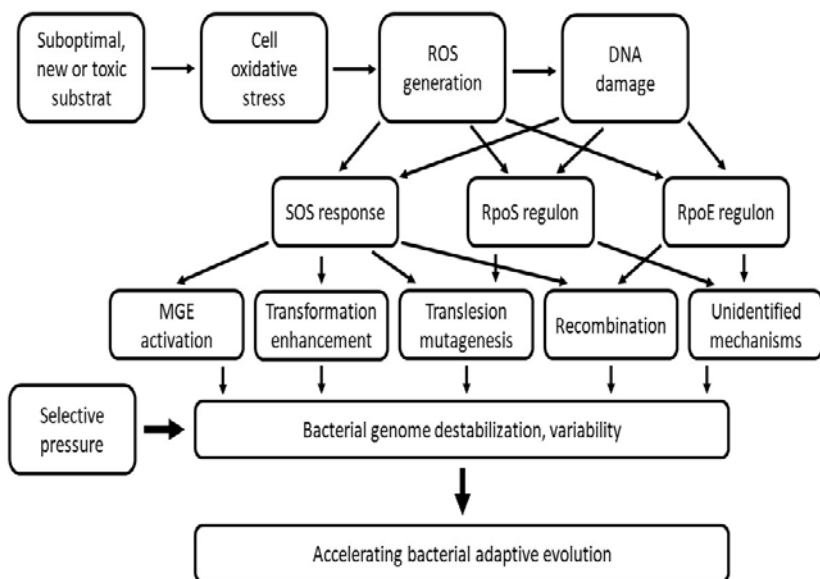


Рисунок 1. Схема влияния субоптимальных и токсичных субстратов на усиление горизонтального переноса генетического материала и ускорение адаптивной эволюции бактерий [1]

Известно, что деградация углеводородных субстратов нефтеокисляющими микроорганизмами сопровождается генерацией активных форм кислорода (АФК) в клетках и накоплением H_2O_2 в окружающей среде. У тех бактерий, которые не обладают метаболическими возможностями утилизации ПАУ, присутствие в среде последних также приводит к развитию окислительного стресса. Образующиеся АФК могут повреждать ДНК и активировать при этом SOS-ответ, а также RpoS- и RpoE- регулоны в клетке. При этом происходит не только репарация поврежденной ДНК, но

также в клетке активируются процессы конъюгации и трансформации. Окислительный стресс значительно усиливает конъюгативный перенос АРГ и может индуцировать способность к естественной трансформации. Кроме того, SOS-ответ также активирует мобильные элементы, например, регулирует встраивание и перестройки генетических кассет интегронов, и, вследствие этого, изменяет набор активных АРГ. Таким образом ПАУ, как, впрочем, и другие поллютанты, вызывающие окислительный стресс, могут усиливать распространение АРГ в микробиоме.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-76-10048, <https://rscf.ru/project/21-76-10048/> в Южном федеральном университете.

Литература

1. Sazykin I.S., Sazykina M.A. The role of oxidative stress in genome destabilization and adaptive evolution of bacteria // *Gene*, 2023, Volume 857, 147170, <https://doi.org/10.1016/j.gene.2023.147170>

СРАВНЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ СОРБЕНТОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ИНДЕКСА РЕМЕДИАЦИИ

Сергеева Ю.Д., Волкова В.Д.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
sergeeva.yulia.dm@gmail.com*

Для ремедиации почв при химическом загрязнении рекомендуют большое количество способов и средств [1]. Нерешенными зачастую остаются вопросы эффективности применения разных препаратов. Как один из вариантов расчета качества ремедиантов предложен индекс ремедиации ИР [3]. Значения индекса ремедиации как меры качества ремедиационных препаратов позволяют ранжировать их эффективность в отношении восстановления нарушенных почв.

Способ определения степени ремедирующей способности по индексу ремедиации был разработан для сравнения действия гуминовых продуктов в почвах, загрязненных тяжелыми металлами [2]. Способ включает оценку состояния почвы, обработанной и необработанной гуминовым продуктом (ГП), при этом степень ремедирующей способности ГП определяют путем сопоставления комплекса показателей в контроле. Способ обеспечивает снижение времени исследования ремедиационной способности применяемых препаратов. Аналогичные расчеты были проведены для серии препаратов разной природы, среди которых наибольший интерес представляло сравнение нано- и микрочастиц нульвалентного железа.

Экспериментальные исследования были проведены большим коллективом в рамках проекта по ремедиации торфяных почв севера.

Для расчета индекса ремедиации используются значения интегрального индекса состояния (ИС) по формуле:

$$ИР_i = 1 - \frac{ИП}{ВО_i} \cdot 100,$$

где: ИП это значения интегрального ИС необработанной почвы, ВО_і это интегральный ИС для варианта обработки *i*. При этом получают значения от 0 до 100. Ранжирование эффективности ремедиации в зависимости от значений ИП и соответствие состоянию почвы представлены в таблице 1.

Таблица 1. Соответствие состояния почвы индексу ремедиации.

Значения ИП	Состояние почвы
0	Сильно нарушенное
10-20	Нарушенное
21-50	Восстанавливающийся
51-80	Близкое к восстановленному
81-100	Восстановленное

Для расчёта ИС в эксперименте использовались результаты следующих исследований: химический анализ почвы на подвижные формы тяжелых металлов, эмиссия CO₂, оценка структурных показателей микроскопических грибов, фитотестирование, тестирование на *Ceriodaphnia affinis*, *Paramecium caudatum*, тестирование на люминесцентных бактериях, с помощью прибора Биотокс.

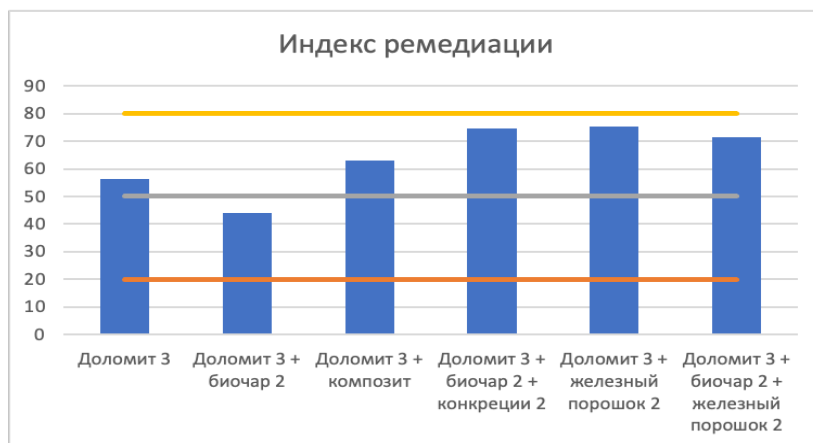


Рисунок 1. Значение индекса ремедиации (ИП) для различных вариантов обработки

В результате были рассчитаны ИС по химическим, биоиндикационным и экотоксикологическим показателям, а затем интегральный ИС. Для оценки интенсивности ремедиации был посчитан индекс ремедиации. Его результаты представлены на графике (рис. 1).

Распределение на этом графике в принципе соответствует значениям ИС, что логично. С помощью расчета ИР можно охарактеризовать ремедиационную активность самих препаратов в используемых вариантах обработки.

Обработка доломитом дает средний ремедиационный эффект, а остальные добавки показывали высокую ремедиационную способность.

В итоге, сравнение ремедиантов на основании расчета индекса ремедиации показало, что инновационный препарат наноккомпозит из наночастиц Fe с биочаром не имеет преимуществ перед традиционными железосодержащими препаратами, а именно, перед микрочастицами Fe в виде порошка, Fe-Mn - конкрециями, а также биочаром.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта РНФ 22-24-00666.

Литература

1. Терехова В.А. Биотестирование почв: подходы и проблемы // Почвоведение. 2011. № 2. С. 190-198.
2. Терехова В.А. Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния // Почвоведение. 2022. № 5. С. 1-14.
3. Терехова В.А., Федосеева Е.В., Панова М.И., Чуков С.Н. Биотестирование гуминовых продуктов как потенциальных ремедиантов (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 795-807.

ВЛИЯНИЕ ФОРМ И ДОЗ АЗОТНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЗЛАКОВЫХ ТРАВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ НА НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННОМ ПОДЗОЛЕ ИЛЛЮВИАЛЬНО-ЖЕЛЕЗИСТОМ

Стройкова М.Н.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
martastr@yandex.ru*

Актуальность работы диктуется опасностью нефти и нефтепродуктов как загрязнителя окружающей среды, в связи с чем исключительную важность приобретает проблема ремедиации почв.

Новизна исследования заключается, прежде всего, в выбранном объекте исследования, которым является нефтезагрязненный подзол иллювиально-железистый, отобранный на территории Самотлорского месторождения. Изучаемый подтип почв не является преобладающим, вследствие чего наблюдается недостаточная изученность особенностей его рекультивации с агрохимической точки зрения. Кроме того, исследуется эффективность фиторекультивации в условиях высокого уровня нефтезагрязнения.

Целью исследования является оценка влияния форм и доз минеральных удобрений на продуктивность злаковых трав и ферментативную активность подзола иллювиально-железистого с разным уровнем нефтезагрязнения, а также выявление оптимального агрохимического фона для достижения максимальной эффективности процесса рекультивации для этого подтипа почв.

В задачи исследования входит определение:

- основных агрохимических показателей почвы;
- продуктивности надземной биомассы злаковых трав;
- содержание макроэлементов в биомассе злаковых трав;
- ферментативной активности почв (уреазы, фосфатазы и де-гидрогеназы);
- остаточное содержание нефтепродуктов.

В рамках исследования был заложен вегетационный опыт длительностью в 56 дней. Повторность опыта трехкратная. Исследовались два уровня загрязнения 5 и 7 г НП/кг почвы (что соответствует высокому уровню загрязнения). Создавалось два уровня обеспеченности макроэлементами – средний и повышенный, а варианты различались формой применяемых азотных удобрений (аммиачная, нитратная и нитратно-аммиачная).

В качестве фиторемедианта использовалась смесь злаковых трав, в которую входят тимофеевка луговая (*Phleum pratense*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*), кострец безостый (*Bromopsis inermis*).

Перед закладкой опыта нефтезагрязненная почва была проанализирована на определение ряда агрохимических показателей. Содержание подвижных форм фосфора и обменного калия очень низкое. По степени кислотности исследуемую почву можно охарактеризовать как среднекислую.

После завершения опыта было определено содержание минерального азота в почве. При дозе нефтезагрязнения 5 г/кг ни доза, ни форма азотных удобрений не оказывает влияния на данный показатель, а при 7 г/кг и форма, и доза удобрений влияют. При этом наибольшее содержание минерального азота наблюдается при повышенном уровне обеспеченности макроэлементами с использованием аммиачной формы и нитратно-аммиачной.

При анализе почвенных образцов на подвижные формы фосфора и на обменный калий обнаружено влияние лишь дозы вносимых удобрений – повышенный уровень обеспеченности показал лучший результат.

Показатель биомассы – это ответ растений на условия возделывания, что является важнейшей характеристикой с точки зрения оптимизации агрохимического фона. При обоих дозах нефтезагрязнения максимальная биомасса злаковых трав определялась на варианте с внесением нитратной формы азотных удобрений при повышенном уровне обеспеченности растений макроэлементами. Однако значения биомассы трав по всем вариантам на почве с более высокой дозой нефтезагрязнения оказались ниже на 32-40% в сравнении с аналогичными вариантами, где доза нефтезагрязнения составляла 5 г/кг.

По завершении опыта проводилось определение содержания азота, фосфора и калия в биомассе злаковых трав.

При меньшем уровне нефтезагрязнения обнаружено влияние дозы удобрений на содержание азота в биомассе трав. При более высоком уровне таковое не наблюдается.

Выявлено, что на содержания фосфора в растениях значимо не влияет форма азотного удобрения при более высокой дозе нефтезагрязнения, но влияет при более низкой.

Практически во всех вариантах повышенный уровень обеспеченности макроэлементами обусловил более высокие значения содержания калия в биомассе по сравнению со средним уровнем. Наибольший результат получен при внесении нитратной формы азотных удобрений.

Наибольшее снижение содержания нефти (на 12% по сравнению с контролем) произошло в варианте с внесением нитратной формы азотных удобрений при повышенном уровне обеспеченности макроэлементами на почве с дозой нефтезагрязнения 5 г/кг. При этом снижение содержания НП в контрольных образцах почвы составило всего 1,6-2,2%, что практически на порядок ниже в сравнении с вариантами, в которые вносились удобрения. Такой результат говорит не только о низкой самоочищающей способности почвы, но и о необходимости и целесообразности создания благоприятного агрохимического фона при фиторемедиации загрязненных земель.

Важнейший показатель биологической активности и состояния биоценозов почвы – ее ферментативная активность, являющаяся также чувствительным экологическим индикатором антропогенного воздействия. Поэтому после окончания опыта было проведено определение уреазной, фосфатазной и каталазной активности нефтезагрязненного подзола иллювиально-железистого (иллювиально-малогумусового).

В почве с обеими дозами нефтезагрязнения значимые отличия по уреазной активности присутствуют только в вариантах, различающихся формой азотных удобрений. Нитратная форма показала наилучший результат.

На фосфатазную активность в почве с дозой нефтезагрязнения 5 г/кг ни доза, ни форма удобрений влияния не оказала. При дозе нефтезагрязнения 7 г/кг наблюдается угнетение активности фосфатазы.

При обеих дозах нефтезагрязнения не обнаруживается статистически достоверных различий при сравнении значений каталазной активности в любых вариантах. Это говорит о том, что

при таком высоком уровне нефтезагрязнения вносимые дозы удобрений не оказывают влияния на каталазную активность почвы.

Таким образом, на основании полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Оптимальной формой азотных удобрений для роста злаковых трав на нефтезагрязненном подзоле иллювиально-железистом оказалась нитратная форма при обеих дозах нефтезагрязнения.

2. Повышенный уровень обеспеченности растений макроэлементами оказался наиболее благоприятным агрохимическим фоном для роста трав-ремедиантов при выращивании на нефтезагрязненном подзоле иллювиально-железистом.

3. Максимальная продуктивность злаковых трав зафиксирована на варианте с нитратной формой азота: в 3,2–3,3 раза выше контрольного варианта и в 1,2–1,6 раз выше остальных удобрённых вариантов.

4. При повышенном уровне обеспеченности растений макроэлементами наблюдается тенденция к повышению содержания азота, фосфора и калия в злаковых травах по сравнению со средним уровнем обеспеченности.

5. Активность уреазы на всех удобрённых вариантах выше по сравнению с контролем в среднем в 1,5–2 раза, а фосфатазная активность ниже в среднем на 20%. На активность каталазы внесение удобрений не оказало существенного влияния.

6. Наибольшее снижение содержания нефти произошло в варианте с внесением азота в нитратной форме и составило 12%.

МЕТОДЫ БИОТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ МИГРАЦИИ ЦИПРОФЛОКСАЦИНА: МОДЕЛЬНЫЙ ФИЛЬТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Тосхопоран А.К., Батаков А.Д., Терехова В.А., Умарова А.Б.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
факультет почвоведения, Москва, Россия
stasy.toskhoporan@gmail.com*

Антибиотики широко распространены как в наземных, так и в водных экосистемах, в том числе в питьевых и грунтовых водах. Источниками поступления в почвы - бытовые и производственные сточные воды, поля и пастбища для выпаса скота. Почва выполняет сорбирующую и транспортную роли по отношению к антибиотикам [1, 10].

Распространение антибиотиков неконтролируемо и может привести к росту устойчивых микроорганизмов, что ставит под угрозу здоровье населения планеты. Этому вопросу уделяется основное внимание исследователей, особенно сложны вопросы экологического нормирования в области применения и утилизации антибиотиков. В литературе недостаточно сведений о миграции антибиотиков в почве. Основная литература посвящена вопросам антибиотикорезистентности почвенного микробиома [3].

Одним из самых популярных фторхинолонов II поколения в современной практике применения считается ципрофлоксацин, который выпускается под множеством наименований, в частности, ципринол, ципролет, ципромед, цифран. Ципрофлоксацин (химическая формула - $C_{17}H_{18}FN_3O_3$) - лекарственное средство с антибактериальными свойствами, действует на грамотрицательные микроорганизмы в периоды покоя и деления и на грамположительные микроорганизмы – в период деления путём подавления важного фермента бактериальной ДНК-гиразы, ответственной за процесс суперспирализации хромосомной ДНК вокруг ядерной РНК, что необходимо для считывания генетической информации, а, следовательно, нарушает синтез ДНК, рост и деление бактерий [8].

Известны разные способы определения антибиотиков. Их выбирают в зависимости от цели, сроков выполнения и техниче-

ского оснащения лаборатории или предприятия. Самыми нетрудоемкими и дешевыми являются микробиологические. Минусом является необходимое время для посева в несколько суток, также отсутствие точных результатов. На данный момент самыми точными считаются физико-химические методы. Среди них перспективными являются хроматографические. Однако, к сожалению, они очень дорогостоящие и имеют сложную и трудоемкую пробоподготовку, которая подбирается непосредственно под исследуемый лекарственный препарат и среду, в которой его определяют. Используется с различными детекторами, в том числе, в тандеме с масс-спектрометрией для сложного определения конкретных веществ из больших групп [4,7].

В настоящее время наблюдается тенденция к использованию аналитических систем - проточно-инжекционный анализ и тестирование. Их преимущества – простота технического исполнения, высокая производительность, надежность и экономичность определений, возможность получения большого объема аналитической информации. Проточные методы анализа используются для оценки безопасности и эффективности применения антибиотиков.

Биотестирование же относится к перспективным методам изучения и выявления активности антибиотиков в окружающей среде, поскольку с помощью анализа воздействий на живые организмы стандартных тест-культур можно прогнозировать негативный эффект на устойчивое функционирование почвенных сообществ.

Основная задача данного исследования заключалась в изучении возможности анализа миграции антибиотика в почвенных субстратах по результатам оценки токсичности.

Объектами исследования для модельного эксперимента служили кварцевый песок и дерново-подзолистая почва (УОПЭЦ «Чашниково»), размер частиц от 0,5 до 1 мм.

Образец пахотной дерново-подзолистой почвы – Albic Retisols (Loamic, Aric, Cutanic, Ochric (Московская область, Солнечногорский район на территории УОПЭЦ «Чашниково») отобран из верхнего слоя 0–20 см (56°02'01 N, 37°10'04 E). Почва сильно окультуренная, с высоким содержанием органического углерода (Сорг 3,86%), рН КС1 – $6,39 \pm 0,05$ [9].

Эксперимент проводили в стандартных пластиковых колонках (трубках) диаметром 4,5 см и высотой 10 см. Пластиковые

трубки являются оптимальными для проведения подобных экспериментов, поскольку дают минимальный пристеночный эффект. Колонки заполняли исследуемыми образцами, насыщая дистиллированной водой для заполнения всего порового пространства влагой.

В качестве метки использовали раствор KCl (1 г/л), поскольку он хорошо сорбируется субстратом. Постоянный напор воды - 1 см. Потенциометрическим методом определяли содержание ионов K^+ , Cl^- . На основании s-образных выходных кривых для каждого субстрата рассчитывали скорость фильтрации, коэффициент гидродинамической дисперсии и шаг смешения [12].

Для изучения миграции антибиотика в колонках с субстратами использовали раствор ципрофлоксацина (торговой марки «АВВА РУС») в концентрации 2,4 г/л. Порции фильтрата собирали в объемах по 20 мл (один такт), суммарный объем профильтрованного раствора составил 400 мл для каждой колонки. Эксперимент проведен в однократной повторности для почвы и кварцевого песка.

О миграции ципрофлоксацина судили по воздействию на бактериальную стандартную тест-культуру – генномодифицированный биолюминесцентный штамм *E. coli* в составе препарата "Эколюм" (высокочувствительный специализированный микробный сенсор, производства ЗАО «НВО Иммунотех», РФ). Для быстрого количественного контроля степени интегральной токсичности фильтрата использовали "Биотокс-10М» с помощью которого учитывают интенсивность спонтанной биолюминесценции при наличии в анализируемых пробах токсических веществ различной химической природы, согласно методике ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.11-04.

В ходе фильтрационного эксперимента были получены 23 порции фильтрата (объемом 20 мл каждая), что соответствует числу тактов фильтрации. В результате получены кривые динамики коэффициента фильтрации в песке и почве, которые имели схожую форму.

После выхода на плато коэффициент фильтрации составил 7,9 м/сут для песка и в 4 раза меньше для почвы - 1,9 м/сут, что по классификации Зейделя определяют как исключительно высокий и очень высокий, соответственно. Кривые переноса K^+ , Cl^- для песка имеют очень близкие значения. Эти ионы песком не сорбируются.

В образцах почв ион калия удерживается. Хлорид-ион, наоборот, достаточно быстро выходит с фильтратом. Значения смен порового пространства составили для песка 6 тактов, для почвы - 4 такта.

Рассчитаны параметры миграции KCl. Шаг смешения составил 10 см для песка и 22 см для почвы. Для песка данный показатель находится в стандартных пределах. При том же размере частиц поровое пространство почвы имеет более извилистое строение по сравнению с песком. Значение для почвы выше стандартного для насыпных образцов. Коэффициент гидродинамической дисперсии в кварцевом песке в два раза выше, чем в дерново-подзолистой почве.

Оценка токсичности по реакциям бактерий показала, что фильтраты в песке характеризуются возрастанием индекса токсичности (It) с повышением номера такта прохождения раствора антибиотика. При этом в первых порциях (такты 4 и 8) токсичность не выявлена, а даже, напротив, наблюдается стимуляция свечения (в 2,5 раза относительно контроля, например, на четвёртом такте). Однако последующие порции фильтрата (12, 16 и 20 такты) содержали возрастающие концентрации антибиотика, что сказалось на увеличении токсичности (It от 50,65 до 82,25) и соответствующем гашении бактериальной биолюминесценции (рис. 1).

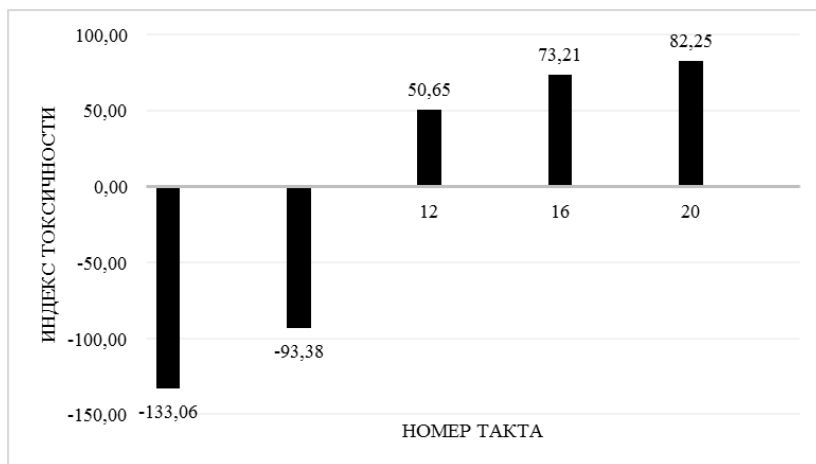


Рисунок 1. Динамика индекса токсичности растворов по мере возрастания тактов фильтрации в песке

В дерново-подзолистой почве результаты фильтрации и токсичности иные, чем в песке. Индексы токсичности всех тактов имели отрицательные значения, что, согласно стандартной методике, соответствует условной норме, т.е. отсутствию токсичности. Тем не менее, наблюдалось плавное повышение значений I_t от 4 такта до 20 такта более, чем в 2 раза (рис. 2).

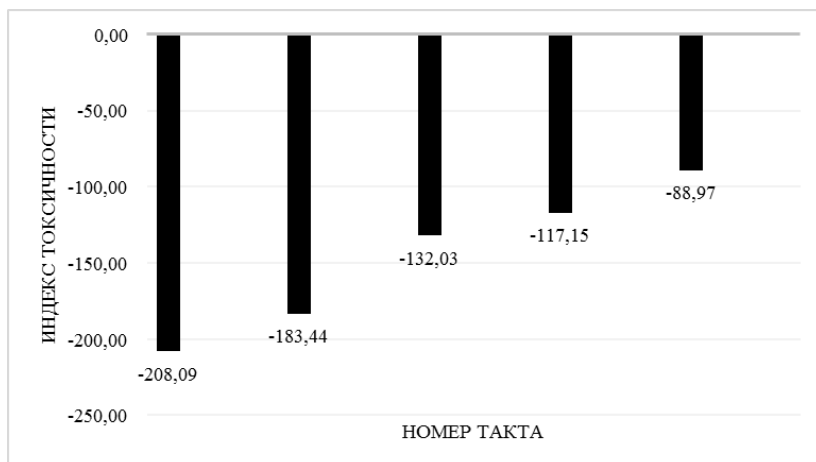


Рисунок 2. Динамика индекса токсичности растворов по мере возрастания тактов фильтрации в почве

Такая динамика I_t в почве свидетельствует о том, что с увеличением количества подаваемого раствора антибиотика токсичность увеличивается. Мы можем предположить постепенное накопление негативного эффекта и в почве. Очевидно, в фильтрациях кварцевого песка это накопление происходит быстрее, и мы можем видеть тот самый предполагаемый переход от условной нормы к токсическому эффекту.

Таким образом, проведенный фильтрационный эксперимент, традиционно использующийся для изучения порового пространства и параметров миграции, судя по данным оценки токсичности порций фильтрата, ожидаемо показал низкую сорбционную способность кварцевого песка и, наоборот, высокую сорбционную способность сильно окультуренной почвы. Наши данные подтверждают возможность анализа миграции антибиотика по профилю почв с помощью метода биотестирования.

Литература

1. Акименко Ю.В. и др. Оценка устойчивости экологических функций почв к загрязнению антибиотиками //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19. – №. 2-2. – С. 207-210.
2. Бузмакова У.А., Кудряшова О. С. Химическая классификация и методы определения антибиотиков //Вестник Пермского университета. Серия: Химия. – 2018. – Т. 8. – №. 1. – С. 6-28.
3. Желдакова Р.А. Механизмы биосинтеза антибиотиков и их действие на клетки микроорганизмов. № ТД-Г. 420/тип. – 2012.
4. Классификация методов определения загрязнения антибиотиками сточных вод / В.А. Алексеев, В.П. Усольцев, С.И. Юран, Д. Н. Шульмин // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Киров, 03–05 декабря 2018 года / Ответственный редактор Т.Я. Ашихмина. Том Книга 1. – Киров: Вятский государственный университет, 2018. – С. 57-59.
5. Козлов Р.С., Голуб А.В. Ципрофлоксацин в современной клинической практике //КМАХ.2010. №2.
6. Коновалова Е.А. и др. Сравнительная характеристика сорбентов, используемых в составе биопрепаратов для очистки почвы от нефтезагрязнений //Наука вчера, сегодня, завтра. – 2016. – №. 5-1. – С. 6-17.
7. Кулапина Е.Г., Баринаова О.В., Кулапина О.И., Утц И.А., Снесарев С.В. Современные методы определения антибиотиков в биологических и лекарственных средах (обзор) // Антибиотики и химиотерапия. 2009. №9-10.
8. Сазыкина М.А. и др. Антибиотики и гены антибиотикорезистентности в окружающей среде //Вестник биотехнологии и физико-химической биологии им. ЮА Овчинникова. – 2016. – Т. 12. – №. 2. – С. 30.
9. Терехова В.А. и др. Фитотоксичность тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности //Почвоведение. – 2021. – №. 6. – С. 757-768.
10. Тимофеева С.С., Гудилова О.С. Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы //XXI век. Техносферная безопасность. – 2021. – Т. 6. – №. 3 (23). – С. 251-265.

11. Тимохина А.С., Соловьева С.А. Применение токсикологических и микробиологических методов исследования при экспертизе пищевых продуктов //Innovations in life sciences. – 2022. – С. 91-92.
12. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв //М.: ГЕОС. – 2011.

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ ПРУДОВ ГОРОДА МОСКВЫ ДО И ПОСЛЕ ОЧИСТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЭФФЕКТИВНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

Урсова Е.А., Тимофеева Е.А.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
uru-sov@yandex.ru*

В ходе трёхмесячного эксперимента исследовалось влияние эффективных микроорганизмов (ЭМ) на основные химические показатели воды шести прудов города Москвы. Показано изменение содержания основных катионов и анионов, тяжелых металлов в воде. Проведена оценка эффективности ЭМ-технологии.

Рост числа промышленных предприятий, селитебных зон и развитие инженерных коммуникаций приводит к усилению антропогенной нагрузки на поверхностные воды в черте городов. Для снижения негативного влияния на водные объекты применяется ряд технологий очистки вод, среди которых можно выделить: механические, физические, химические, физико-химические, биологические (в т.ч. использование эффективных микроорганизмов), комбинированные и другие.

Эффективные микроорганизмы (ЭМ) являются консорциумом полезных штаммов и включают в себя преимущественно популяции молочнокислых и фотосинтезирующих бактерий и дрожжей. Концепция ЭМ была предложена японским профессором Терау Хига, который представил выборку из более чем 80 видов микроорганизмов, отобранных из различных сред. Ряд авторов отмечает [1-5], что ЭМ применяются для разных природоохранных задач: очистки загрязненных озер, заливов, септиков, сточных вод, фильтрата свалок, в отдельных случаях водоподготовки. На текущий момент недостаточное количество работ, прежде всего русскоязычных, посвящено ремедиации городских прудов с помощью ЭМ.

Вместе с тем, требования к качеству воды, предъявляемые к объектам разных категорий назначения, различны, а эффективность работы ЭМ зависит от климатических условий, ландшафт-

ных характеристик и ряда других аспектов, поэтому требуется проведение исследований с учетом множества факторов.

Целью данной работы является оценка влияния технологии эффективных микроорганизмов на гидрохимические показатели качества воды прудов города Москвы.

Объектами исследования являются 6 прудов на территории города Москвы и посёлка Московский: Старинный пруд в Аптекарском огороде, Федеративный пруд в Новогиреево, Заводской пруд в поселке Московский, пруд Красный Казанец в районе Вешняки, и Верхний и Нижний Коломенские пруды в музее-заповеднике Коломенское.

Эксперимент проводился в период с мая по сентябрь 2022 года. Условно эксперимент можно разделить на 4 этапа: рекогносцировочный, подготовительный, первый отбор проб и внесение препарата, контроль. Приготовление ЭМ-колобков проходило на территории Ульяновского лесопарка 30 и 31 мая 2022 года. ЭМ-колобки изготавливают (из расчета на 10 колобков) на базе глины (1 кг), ферментированных органических веществ (ОФЭМ приобретается в ООО «Приморский ЭМ-центр» – 200 мл), питательной среды – патока свекольная (2-3 мл), хлорированной или отстоянной воды (200-300 мл) и препарата АКВА-ЭМ-1 (2-3 мл).

С 5 по 10 июня 2022 года, непосредственно перед применением препарата с ЭМ, водолазами на всех исследуемых прудах была произведена очистка дна водоемов от мусора (стеклянные бутылки, банки, резиновые крышки), крупных веток и т.п. Были отобраны пробы воды в трехкратной повторности. Далее в водоёмы был внесен препарат АКВА-ЭМ-1 из расчета 1 л препарата на 10000 л воды. ЭМ-колобки брошены в водные объекты из расчета 1-2 штуки на 1 м² площади дна. Оценка состояния воды проводилась в 2 этапа. Второй отбор проб проходил через месяц, с 26 июля по 3 августа 2022 года. Третий отбор проб прошел с 5 по 14 сентября 2022 года.

Для оценки степени загрязнения исследуемых вод были выбраны индексы: гидрохимический индекс загрязнения воды (ИЗВ), показатель химического загрязнения (ПХЗ-10), индекс суммы отношений концентраций, оценка по уровням уровня токсического загрязнения воды, отношение концентрации загрязняющего вещества к ПДК (КПДК). Также использовалась эффективность очистки вод.

Таблица. Оценка степени загрязнения вод после очистки по интегральным показателям (КО – класс опасности).

Пруд	ИЗВ	ПХЗ-10 (1,2 КО)	ПХЗ-10 (3,4 КО)	СУ 1,2 КО	СУ 3,4 КО
По ПДК рыб-хоз					
Старинный	6,3 ↑	23,8 ~	23,1 ↑	17,8 ~	23,8 ↑
Федеративный	4,8 ↓	23,8 ~	27,4 ↑	17,8 ~	28,5 ↑
Заводской	16,2 ↓	23,8 ~	77,2 ↑	17,8 ~	78,7 ↑
Красный Казанец	4,7 ↑	23,8 ~	22,5 ↑	17,8 ~	23,2 ↑
Верхний Коломенский	12,8 ↑	23,8 ~	60,5 ↑	17,8 ~	61,7 ↑
Нижний Коломенский	11,5 ↓	23,8 ~	20,1 ↓	17,8 ~	21,1 ↓
По ПДК культ-быт					
Старинный	3,6 ~	7,7 ↑	2,9 ↑	1,7 ↑	3,0 ↑
Федеративный	1,7 ↓	7,7 ~	4,1 ↑	1,7 ~	4,1 ↑
Заводской	6,0 ↓	8,4 ↑	4,9 ↑	2,4 ↑	4,9 ↑
Красный Казанец	1,7 ↓	7,6 ~	3,8 ↑	1,6 ~	3,8 ↑
Верхний Коломенский	3,0 ↓	7,7 ~	6,3 ↑	1,7 ~	6,3 ↑
Нижний Коломенский	3,3 ↓	7,7 ~	11,2 ↑	1,7 ~	11,2 ↑

Вода 6 прудов г. Москвы была отнесены по классификации Алекина к карбонатному классу, кальциевой группе и первому типу (жесткие пресные или солоноватые) как до, так и после очистки.

До очистки качество вод 6 прудов г. Москвы по показателю ИЗВ отнесено к категории грязная (Старинный, Красный Казанец), очень грязная (Федеративный), чрезвычайно грязная (Заводской, Верхний и Нижний Коломенский) по отношению к ПДК водных объектов рыбохозяйственного назначения. По отношению к ПДК культ-быт качество вод характеризовалось как:

загрязненная (Старинный, Красный Казанец, Верхний Коломенский) и очень грязная (Федеративный, Заводской, Нижний Коломенский). По ПХЗ-10 (1,2 и 3,4 КО) загрязнение вод попадало в категорию «относительно удовлетворительное» по отношению к ПДК культ-быт. По отношению к ПДК объектов рыбохозяйственного назначения – качество вод большинства прудов по ПХЗ-10 (3,4 КО) попадает в категорию «чрезвычайная экологическая ситуация». Кпдк составил от 2 до 5 для большинства загрязнителей. Пруды – бессточные, поэтому загрязнения накапливаются постоянно.

Положительная эффективность ЭМ для очистки прудов была выявлена для следующих показателей качества вод: минерализация (6 прудов, до 45%), взвешенные вещества (4 пруда, до 76%), нитрит-ион (4 пруда, до 90%), ион калия (3 пруда, до 67%), БПК5 (3 пруда, до 98%). Полученные данные согласуются с литературными: ЭМ эффективны в отношении очистки большинства органических и взвешенных веществ [2, 3]. Снижение содержания калия также возможно из-за потребления ЭМ.

Нулевая эффективность очистки воды ЭМ (их неэффективность) была выявлена для следующих показателей: прозрачность, содержание растворенного кислорода, ионов кадмия, меди, молибдена, никеля, свинца, ртути, хрома (общего), а также отсутствие влияния на pH – для всех исследуемых прудов [4].

Отрицательная степень очистки воды прудов ЭМ (дополнительное поступление и вторичное загрязнение) была выявлена для следующих показателей: цинк (6 прудов) – см. рис. 1, марганец (6 прудов), сульфат-ион (5 прудов), АПАВ (4 пруда), железо общее (4 пруда), запах (3 пруда), аммоний-ион (3 пруда), нитрат-ион (3 пруда), перманганатная окисляемость (3 пруда), хлорид-ион (3 пруда), щелочность (3 пруда). Уровень содержания металлов повысился, предположительно, из-за вторичного загрязнения из донных отложений прудов. Содержание соединений азота повышается из-за ускорения процессов нитрификации и аммонификации, также наблюдается переход разных форм азота.

Класс качества воды 6 прудов г. Москвы после применения ЭМ по ИЗВ при ПДК водных объектов рыбохозяйственного назначения не изменился в 4 прудах, повысился – в Старинном, понизился – в Федеративном. Класс качества вод по ИЗВ при ПДК культ-быт не изменился в 3 прудах, снизился – в Федера-

тивном, Красном Казанце и Нижнем Коломенском. Повышение качества преимущественно достигнуто из-за снижения показателя БПК₅ до 6 раз. По ПХЗ-10 категория загрязнения вод не изменилась (для двух нормативов).

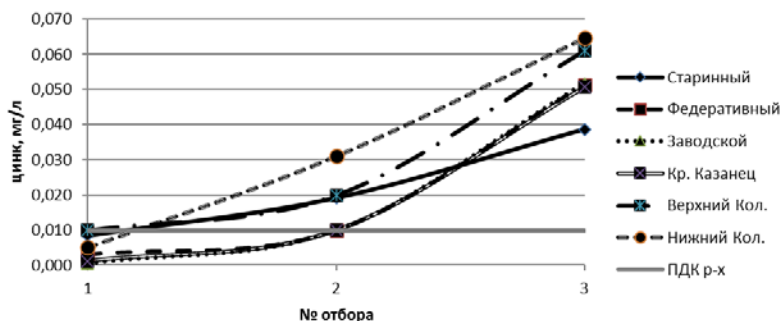


Рисунок 1. Усредненное содержание цинка (мг/л) в течение эксперимента по всем прудам на каждом этапе отбора.

Применение ЭМ для очистки воды прудов в природно-климатических условиях Москвы может быть рекомендовано только в случаях наличия легкоокисляемых органических загрязнителей, при этом пруд не должны быть загрязнен большинством неорганических загрязнителей (в т.ч. ТМ) – поскольку ЭМ в их отношении неэффективны, а в отдельных случаях приводят к увеличению ряда показателей. Рекомендуется применение ЭМ в прудах при низком уровне загрязнения донных отложений, поскольку при высоком уровне ЭМ могут приводить к вторичному загрязнению вод.

Литература

1. Ekepeghere, K.I., Kim, B.-H., Son, H.-S., Whang, K.-S., Kim, H.-S., & Koh, S.-C. Functions of effective microorganisms in bioremediation of the contaminated harbor sediments. // *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, – 2012, 47(1), 44–53.
2. El Karamany H.M., El Shatoury S.A., Ahmed D.S., Saleh I.S. Potential of effective microorganisms (EM) for conventional activated sludge upgrade // *International Water Technology Journal*. – 2013. – Vol. 3, Iss. 2. – P. 87. 18.

3. Zhang Z., Ding S.Q., Yang Y.S., Zuo X.J., Xu Y. EM Biodegrading Characteristics of Petroleum Hydrocarbon in Artificial Seawater. // *Advanced Materials Research*, – 2011, 356-360, 1145–1151.
4. Zhou, S., Wei, C., Liao, C., & Wu, H. Damage to DNA of effective microorganisms by heavy metals: Impact on wastewater treatment. // *Journal of Environmental Sciences*, – 2008, 20(12), p. 1514–1518.
5. Лапшакова, Л.А. Перспективы применения эффективных микроорганизмов для очистки озер Амурской области / Л.А. Лапшакова // *Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития: тезисы докладов всероссийской научно-практической конференции, Благовещенск, 15 апреля 2020 года.* – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2020. – С. 199.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Урусова Е.А.¹, Тимофеева Е.А.¹, Евсеева Е.А.²

*¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет Почвоведения, Москва, Россия*

*²ООО "Приморский ЭМ-Центр"
uru-sov@yandex.ru*

Применение эффективных микроорганизмов (ЭМ) в сельском хозяйстве способствует повышению урожая и его качества, а также способствует улучшению показателей качества почв. Обобщен опыт применения технологии ЭМ на более чем 20 культурах: плодово-ягодные, зернобобовые, пропашные и другие. Отклик сельскохозяйственных культур зависит от ряда условий: почвенно-климатических, физиологических свойств культур и особенностей типа внесения препарата.

Особенность земледелия как первичной системы производства продукции заключается в высокой зависимости от местных природных условий. Исследования в области биологического воспроизводства почвенного плодородия, использования природных комплексов для создания комфортных условий развития сельскохозяйственных культур, получило развитие в методах альтернативного сельского хозяйства, в том числе с применением ЭМ-технологий.

ЭМ-технология – это микробиологическая технология с использованием так называемых «эффективных микроорганизмов» разработана японским ученым профессором Теруо Хига, который создал сложный по качественному составу ЭМ-препарат, известный под названием «Восток ЭМ-1», или «Кюсей ЭМ-1» (Kyusei-EM-1), как результат совместной культивации более чем 80 микроорганизмов. ЭМ-препарат является основой ЭМ-технологии. В одной биокультуре соединены аэробные и анаэробные разновидности микроорганизмов — азотфиксирующие, фотосинтетические и молочнокислые бактерии, дрожжи и грибы, а также продукты их жизнедеятельности. Препараты ЭМ-технологии находят применение для репродукции плодородия почв, в защите растений от вредителей и бо-

лезней, для биоконверсии растительного сырья при компостировании органических отходов, в животноводстве, пищевой промышленности, в других отраслях народного хозяйства [1].

Существуют различные точки зрения в оценке эффективности органического земледелия. В связи с этим были проанализированы заложенные в разное время опыты по изучению влияния микробиологического удобрения «Восток ЭМ-1» на параметры биологической активности почвы и продуктивность растений.

Целью данной работы является оценка результатов применения технологии эффективных микроорганизмов в сельском хозяйстве на примере российских производителей.

Объектами исследования являются отчеты за 2003-2022 года, включающие 22 культуры: рис, яблоня, вишня, земляника садовая, картофель, капуста белокочанная, томат, сахарная свекла, морковь, кукуруза, сорго, рапс, люцерна, пшеница (яровая и озимая), ячмень (яровой), соя, просо, подсолнечник, овес, чечевица.

Зернобобовые культуры. Результаты анализа, проведенного в течение вегетационного периода, показали, что применение Восток ЭМ-1 на посевах пшеницы яровой привело к увеличению урожайности в среднем на 23%, максимальные значения достигают 85% при обработке почвы, семян, а также растений по вегетации. Изменение массы зерен незначительно, за исключением опыта в Красноярском крае в 2020 г., где прибавка составила 54%. Наблюдается увеличение биометрических параметров, в том числе длины корней. Значительно удаление сорняков и сокращение распространения заболеваний: корневая гниль на 56% по сравнению с контролем (в некоторых случаях достигая 90% и более), мучнистая роса – 71%, септориоз – 40%, бурая ржавчина – 48%. Не наблюдается выраженных изменений по показателям всхожести, сохранности продукции до уборки, белка, в частности клейковины на +19%. Дополнительный доход от реализации продукции составляет в среднем 34%. В некоторых отчетах подсчитанная хозяйственная эффективность составляет от 162 до 176%.

Урожайность озимой пшеницы увеличивается в среднем на 14%, максимально достигая 36%, вероятно, за счет увеличения массы зерен. Применение препарата способствовало незначительной прибавке по биометрическим параметрам, в том числе увеличивается длина корневой системы.

Увеличение урожайности ячменя ярового колеблется в широких пределах, достигая 34% в варианте с дополнительным применением пестицидов. Масса зерен увеличивается в среднем на 3%, максимально достигая 19%. Применение Восток ЭМ-1 способствовало уменьшению распространения корневой гнили на растениях ячменя и сокращению количества плесневых семян на 60%. Заметна тенденция на сокращение распространения гельминтоспориоза на 52% и мучнистой росы на 50%. В одном из опытов отмечено сокращение числа щуплых зерен на 60%. Наблюдается минимальное изменение зольности и содержания белков, в частности протеина. Дополнительный доход от реализации продукции составляет от 4 до 69% по сравнению с контролем.

Результаты исследования показали, что урожайность овса ярового в результате использования микробиологического препарата была достаточно большой, и превысила контроль более чем в 2 раза.

Использование препарата Восток ЭМ-1 на культуре кукурузы не дало существенных изменений ни по одному параметру.

Средняя прибавка к урожайности сои по сравнению с контрольным участком составляет 8%, при этом максимальное значение достигает 26%. Увеличение зеленой массы растений сои в среднем составляет 38%. Наблюдается увеличение продуктивности семян сои и количества бобов в среднем на 37%, причем эффект усиливается с увеличением кратности обработки. Обработка семян сои перед посадкой заметно снижает их зараженность. Отмечается незначительная тенденция к увеличению сохранности растений к уборке при применении микробиологического препарата в дозе 20 л/га. Не заметно влияние на содержание белка.

Применение Восток ЭМ-1 на культуре чечевицы способствовало незначительному увеличению урожайности в среднем на 11%. По остальным показателям существенных изменений не наблюдается.

Увеличение урожайности подсолнечника составляет в среднем 10% за счет увеличения массы зерен на 7%. Использование препарата Восток ЭМ-1 на культуре подсолнечника не имело существенного влияния всхожесть семян, но способствовало незначительному увеличению биометрических параметров. При переработке семян отмечается увеличение содержания масел на 14%.

Наблюдается увеличение урожайности просо на 14% за счет увеличения массы зерен и зеленой массы. Исключение составляет результат выращивания просо сорта Золотистое в Саратовской области в 2019 году, где показатель урожайности несколько выше на контрольном участке, вероятно, за счет агроклиматических условий эксперимента.

Овощные культуры и картофель. Результаты анализа, проведенного в конце вегетационного периода, показали, что применение Восток ЭМ-1 на посадках картофеля привело к увеличению урожайности в среднем на 43%. Присутствует также вариант, где урожайность на контрольном участке ниже опыта на 38%. Такой результат производитель связывает с краевым влиянием растений; наличие защитной полосы в виде одного ряда растений, видимо было недостаточным, поэтому растения на варианте (крае поля) находились в условиях, отличающихся от внутренней части делянки.

Также на посадках картофеля применение микробиологического препарата способствовало сокращению развития фитофтороза и корневой гнили на растениях.

Использование препарата на растениях капусты белокочанной способствовало снижению распространения капустных мух на 25% и сосудистого бактериоза более чем на 60%. Также увеличилась урожайность культуры в среднем 43%.

Применение микробиологического препарата на культуру томатов не имело существенного влияния ни на урожайность, ни на биометрические параметры. Биологическая эффективность Восток ЭМ-1 против альтернариоза на разных этапах эксперимента составила от 25 до 44%, достигнув максимума в фазе созревания плодов.

В результате исследования применения препарата на посадках моркови отмечается незначительное увеличение урожайности и рост содержания витамина С на 41% по сравнению с контролем. Также видно незначительное снижение распространения альтернариоза и церкоспороза.

Анализ результатов исследования применения препарата Восток ЭМ-1 на посадках свеклы сахарной показал увеличение всхожести, а также снижение содержания нитратов (на 26%) и распространения церкоспороза. Урожайность свеклы не имеет однозначной динамики.

Одновременно среди овощных культур не наблюдалось существенное изменение сахаристости, кислотности и содержания витамина С.

Фруктово-ягодные культуры. Анализ результатов по укоренению черенков вишни показал, что использование препарата Восток ЭМ-1 способствовало увеличению длины корней в среднем на 40%. Наибольший положительный эффект наблюдался при добавлении препарата в дозе 10 мл/л при мелкодисперсном орошении черенков вишни сорта ВП-1.

Использование препарата Восток ЭМ-1, а также ферментированных отрубей, на растения земляники садовой привело к незначительному увеличению урожайности на 15% за счет увеличения массы плодов. Схожая динамика отмечается у яблони, где также наблюдается снижение распространения парши обыкновенной на 70%

Рис. Результаты определения урожайности риса не показали существенных изменений в результате применения ЭМ-препарата, прибавка по показателю составила от 3 до 9% за счет увеличения массы зерен. Также есть незначительная прибавка по биометрическим параметрам.

Прочие культуры. В результате применения ЭМ препарата на культуре люцерны наблюдалось увеличение биометрических показателей, в частности высоты растений в среднем на 10 см, а также длины корней на 31%. Но изменение урожайности составило всего 11%.

Результаты анализа опытов показали, что применение Восток ЭМ-1 на посевах сорго не имело существенного результата помимо незначительного увеличения урожайности за счет увеличения массы зерен на 13% и биометрических параметров. Также применение препарата не имело заметного отклика на посевах рапса.

Стерня. Анализ результатов по использованию микробиологического препарата Восток ЭМ-1 для обработки стерни показал, что использование препарата Восток ЭМ-1 способствовало увеличению общей биогенности почвы в среднем на 37%, интенсивности разложения целлюлозы – на 46% и разложения растительных остатков – более чем на 80%. Причем эффект усиливается при увеличении дозировки препарата.

В отчетах также упоминается повышение устойчивости различных культур к засухам, низким температурам и другим

неблагоприятным условиям произрастания. К тому же использование данного препарата по расчетам производителей требует меньших затрат.

В целом применение микробиологического препарата Восток ЭМ-1 в сельском хозяйстве для стимулирования роста и развития растений, а также защиты от различных болезней, производит накопительный эффект. Поэтому рекомендуется анализировать многолетние (не менее 3 лет) исследования для выявления более точных закономерностей.

Литература

1. Корсунова, Т.М. Устойчивое сельское хозяйство / Учебное пособие. - СПб.: Изд-во «Лань», 2019. -132с.
2. Евсеева, Е. А. ЭМ-препараты и сфера их применения / Е. А. Евсеева // Защита и карантин растений. – 2019. – № 6. – С. 7-8.

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЦИАНОБАКТЕРИЙ И МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ИЗ ВХОДНЫХ ЗОН ПЕЩЕР

**Федоров А.С.¹, Кривошеева Е.А.¹, Ковалева А.О.¹,
Мазина С.Е.^{2,3}**

¹Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,
Институт экологии, Москва, Россия

²Федеральное государственное унитарное предприятие
Научно-технический центр радиационно-химической безопасности
и гигиены Федерального медико-биологического агентства,
Москва, Россия

³Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
sophytum@mail.ru

Местообитания пещер отличаются стабильностью, по сравнению с поверхностными местообитаниями. Диапазон колебаний температур и влажности минимален в пещерах, температура чаще всего имеет положительное значение и соответствует среднегодовой на поверхности в зоне расположения пещеры [10], а влажность воздуха составляет 60-100%. Для входных участков пещер также характерно уменьшение колебаний температуры и повышенная влажность, а также градиент освещенности. Данные условия идеальны для развития сообществ с доминированием водорослей и цианобактерий. В большинстве пещер морфологические особенности входных зон обеспечивают защиту обитающих в них организмов от механических воздействия снежно-ледовых масс, периодических потоков дождевых или паводковых. Исключение составляют входы-колодцы, поноры или воклюзы, но, в зависимости от размеров входной зоны, эти воздействия могут быть более или менее выражены. В литературе отмечено, что входные зоны пещер являются экотонами и рефугиумами [12].

В пещерах преимущественно преобладают представители *Cyanobacteria*, но доминантами в сообществах часто бывают и виды *Chlorophyta*. В зависимости от субстрата и освещенности, обводненности местообитания и влажности, заноса определенных видов, формируется несколько типов характерных для пещер

сообществ. Это сообщества с доминированием одноклеточных зеленых водорослей, чаще всего *Chlorella vulgaris* Beijerinck, реже других видов *Chlorella*, родов *Pseudococcomyxa* или *Stichococcus*. В таких сообществах могут присутствовать другие зеленые водоросли, представители *Xanthophyceae* *Tribonema* и *Klebsormidium*, протонема мхов. Сообщества предпочитают рыхлые и плотные известняковые субстраты, глинистые отложения и кальцитовые поверхности без потоков воды.

Сообщества с доминированием нитевидных цианобактерий, преимущественно *Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet & Flahault. и представителей *Oscillatoria Phormidium*, *Leptolyngbya* располагаются в ванночках или озерах пещер с отсутствием движения воды или очень слабыми водными потоками. В состав сообществ могут входить водоросли *Bacillariophyceae*, чаще всего *Amphora*, различные колониальные цианобактерии и водоросли *Chlorophyta*.

На увлажненных поверхностях с потоками воды или каплями, присутствующими большую часть сезона, формируются биопленки с преобладанием видов родов *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Leptolyngbya*, *Nostoc*, формирующих плотные образования до нескольких миллиметров толщиной от темно-зеленого до черного цвета. Матрикс биопленок плотный, часто имеет бежевый или коричневатый оттенок.

Колониальные формы цианобактерий со слизистыми чехлами доминируют на плотных поверхностях известняка, на которых могут располагаться маломощные глинистые отложения, реже аналогичные сообщества можно встретить на более мощных глинистых отложениях. В этих сообществах доминируют представители родов *Gloeotheca*, *Gloeocapsa*, *Leptolyngbya*.

Особенно интересными обитателями карстовых пещер являются цианобактерии с известняковыми чехлами, образующие макроскопические разрастания на поверхностях известняка и кальцита, реже на глинистых отложениях. Их местообитания отличаются периодическим интенсивным увлажнением, осуществляемым водами осадков, фильтрующимися сквозь породу и в виде струй или капель, увлажняющих поверхности. Среди доминирующих видов чаще всего встречаются *Scytonema julianum* Meneghini ex B.A. Whitton *Scytonema drilosiphon* Elenkin & V.I. Poljansky, *Tolypothrix calcarata* Schmidle, в массе трихомов можно обнаружить протонему и мхи, представителей рода

Aphanocapsa и единичные трихомы нитчатых цианобактерий, как правило виды с очень тонкими трихомами родов *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Leptolyngbya*.

Особые условия пещер определяют необходимые адаптации обитающих в них видов. Если основная часть пещеры отличается стабильными характеристиками микроклимата, то для входной зоны это утверждение верно лишь частично. Действительно, диапазон колебаний температуры и влажности воздуха и субстратов для многих пещер и гротов меньше, чем на поверхности, часто отсутствует влияние снежно-ледовых масс, водных потоков. При этом, в зависимости от морфологии входа, периодические воздействия, приводящие к разрушению большей части сообществ возможны: различные механические воздействия, редкие периодические водные потоки, смывающие сообщества, выедание сообществ, снижение влажности, приводящее к высыханию. По сравнению с поверхностными местообитаниями видов, встречающихся в пещерах, вероятность описанных воздействий ниже, что приводит к формированию закрытых климаксных сообществ, расположенных в экотонной зоне. Часто во входной зоне пещер наблюдается повышенное содержание CO_2 и высокая концентрация радона, что дает возможность выделять виды, устойчивые к воздействию радиации [1, 4, 9]. Глинистые отложения и известняковые породы гетерогенны и могут иметь различный спектр минералов, в составе которых могут быть и тяжелые металлы. Таким образом, можно заключить, что многие виды фототрофов из пещер имеют потенциал для использования в биоремедиации почв, переработке отходов, выделении определенных веществ [6]. В составе видов пещер присутствуют виды, которые используются в подобных разработках, что дает основание для поиска в пещерах более перспективных штаммов.

Как показали последние исследования, несмотря на стабильность температурных условий в пещерах, виды водорослей и цианобактерий, выделенные из входной зоны, имеют адаптации к широкому температурному диапазону [3].

Среди цианобактерий пещер практически в любом сообществе можно обнаружить виды, способные фиксировать атмосферный азот. Во входной зоне в условиях низкого освещения цианобактерии получают преимущество, являются основными продуцентами органического вещества и играют основную роль в формировании солоидов и почвоподобных тел [8].

Анализ потоков углерода сообществ фототрофов пещер выявил высокий уровень продуктивности цианобактериальных сообществ [11].

Для цианобактерий вообще и для видов из пещерных сообществ присутствует сложность выделения видов в чистые культуры. В случае видов-доминантов таких проблем, как правило, не возникает, но культивирование минорной компоненты сообщества, редких видов, удается не часто. Однако в составе сообщества эти виды успешно культивируются. Интересно отметить, что в питательной среде структура сообщества может меняться, а также структура сообщества меняется при различных воздействиях на сообщество, добавлении в среду солей тяжелых металлов, сильно загрязняющих веществ, в таком случае численность редких видов увеличивается. Аксенизация культур цианобактерий является проблемой, которая не только осложняет их выделение и хранение, но и эксперименты с оценкой особенностей штаммов и взаимодействий цианобактерий с другими видами. Ряд экспериментов с оценкой взаимодействия водорослей и цианобактерий из пещер с микромицетами показал, что выявляются примеры антагонизма и коадаптаций видов. Вероятность выявления коадаптаций у видов из одной пещеры и одного сообщества повышается [7].

Обнаружена антибактериальная активность фототрофов пещер, выделение токсинов и ингибиторов. Для ряда видов, доминирующих в пещерных сообществах, известно их использование в биотехнологии: *Leptolyngbya tenuis* (Gomont) Anagnostidis & Komárek, *Leptolyngbya foveolarum* (Gomont) Anagnostidis & Komárek, *Nostoc paludosum* Kützing ex Bornet & Flahault, *Nodularia spumigena* [2].

Штаммы из пещерной среды могут иметь ряд особенностей, которые делают их более перспективными для применения, например, широкий диапазон адаптаций, высокую продуктивность, способность к гетеротрофному росту, азотфиксация, образование плотных биопленок на поверхности грунтов [5].

Выделение видов из пещер с входными зонами, постоянно заполненными снежно-ледовыми массами, дает возможность разрабатывать препараты на основе бактерий и водорослей, способных к росту при низких температурах. Также сохраняется возможность создания искусственных ассоциаций на основе пещерных видов как фототрофов, так и гетеротрофов, использо-

вание продуктов синтеза пещерных видов, например, биологически активных веществ или карбонатных чехлов.

В последние годы много внимания уделяется рассмотрению вопросов использования природных сообществ для решения биотехнологических задач. Этот подход перспективно применять для работы с сообществами пещер, поскольку есть возможность выделять не отдельные штаммы с конкретными свойствами, которые нужно адаптировать под условия среды, а устойчивые консорции с целым набором полезных свойств, приспособленные к выживанию в окружающей среде. Трансформация структуры сообщества в процессе культивирования в лабораторных условиях может способствовать ускоренному росту сообщества. Влияние различных факторов окружающей среды также изменяет структуру в пользу преобладания видов с необходимыми адаптациями, но при этом вероятность сохранения сообщества велика.

Наиболее перспективными направлениями использования цианобактерий и водорослей из пещер являются биоремедиация, повышение плодородия почв и разработка биоудобрений.

Литература

1. Волкова Н.Д., Боков А.В., Коннычев М.А., Лямкин П.В., Мазина С.Е. Воздействие протонного излучения на зеленые водоросли *Stichococcus bacillaris* // Сборник трудов школы-конференции молодых учёных «Ильинские чтения» 10-11 октября. 2019. с 56-57.
2. Дидович С.В., Москаленко С.В., Темралеева А.Д., Хапчаева С.А. Биотехнологический потенциал почвенных цианобактерий (обзор) // Вопросы современной альгологии. 2017. (2), 1-1.
3. Козлова Е.В., Мазина С.Е., Суандзара Беандруна Родлиш Температурный фактор в формировании сообществ фотических зон некоторых пещер Воронежской области // Биологическое разнообразие и биоресурсы степной зоны в условиях изменяющегося климата, Сборник материалов Международной научной конференции, посвящённой 95-летию Ботанического сада Южного федерального университета (24-29 мая 2022 г.) Ростов-на-Дону – Таганрог Издательство Южного федерального университета 2022 С. 662-667.
4. Мазина С.Е., Козлова Е.В., Суандзара Беандруна Родлиш, Бенитсиафантука Элид Ульрих, Федоров А.С., Северин А.В., Николаев А.Л., Саранцев А.В. Цианобактериальное сообщество как объект

- изучения воздействия радиации // Вестник БГПУ им. М. Акмуллы». 2022. с. 72-81.
5. Мазина С.Е., Попкова А.В. Сообщества карстовых пещер как источник видов, пригодных для восстановления почвенного плодородия и рекультивации // Сборник тезисов V Международной научной экологической конференции, посвященной 95-летию Кубанского ГАУ. 2017. с. 350-352.
 6. Пичугина Е.К., Беандруна Суандзара Родлиш, Бенитсиафантука Элид Ульрих, Федоров А.С., Годой Гуадамус Пабло, Мазина С.Е. Устойчивость цианобактерий к загрязнителям как характеристика условий обитания на примере *Leptolyngbya tenuis* (Gomont) Anagnostidis & Komárek // Тезисы докладов VII Пущинская школа-конференция «Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов» 6-9 декабря. 2021. с. 75-76.
 7. Попкова А.В., Мазина С.Е., Багмет В.Б., Егупова Е.Ю., Зволинский В.П. Взаимодействие между фототрофами и микромицетами из пещерных сообществ обрастаний // Современная микология в России. Том 6. Материалы 4-го Съезда микологов России. М.: Национальная академия микологии. 2017. с. 393-394.
 8. Турчинская С. М., Семиколенных А. А., Мазина С. Е., Зазовская Э. П. Изотопный состав углерода и азота компонентов подземных карстовых геосистем на примере экскурсионных пещер Предуралья и Кавказа. // Известия РАН. Серия географическая, 2022, том 86, № 5, с. 715–730
 9. Федоров А.С., Кочетков С.Н., Мазина С.Е. Устойчивость к воздействию радиации цианобактерий и водорослей как индикатор наличия радиации в пещерах Сборник материалов школы-конференции молодых учёных и специалистов «Ильинские чтения 2022» 06-07 октября 2022 г. Москва с. 61-63.
 10. Badino, G. Underground meteorology-“What’s the weather underground?” // Acta Carsologica. 2010, 39, p. 427–448.
 11. Mazina, S.E., Kozlova, E.V., Turchinskaya, S.M., Pichugina, E.K., Yuzbekov, A.K., Pešić, V. Carbon fluxes intensity from substrates and phototrophic consortiums of the photic zones in Montenegro caves Ecologica Montenegrina. 2020. T. 34, p. 20-33
 12. Monro, A.K., Bystriakova, N., Fu, L., Wen, F. and Wei, Y. Discovery of a diverse cave flora in China // PLoS ONE. 2018. 13.

ВЛИЯНИЕ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСШИХ РАСТЕНИЙ

Фортуна А.А., Авдулов Д.А., Ковалева Е.И.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
факультет почвоведения, Москва, Россия
katekov@mail.ru*

Нефть и нефтепродукты остаются неотъемлемой частью существования человечества на нашей планете. На территории России площади нефтезагрязненных почв составляют десятки тысяч гектар. Ежегодно в мире при добыче, транспортировке, хранении и использовании нефти и нефтепродуктов в окружающую среду попадает около 50 млн. т углеводов. На территории России площади нефтезагрязненных почв составляют десятки тысяч гектар. Ставропольский край является регионом нефтедобычи; это предполагает, что в результате осуществления хозяйственной деятельности могут возникнуть аварийные ситуации в виде разливов нефти, приводящие к загрязнению почв нефтепродуктами. В связи с этим, важным аспектом является экологическая оценка нефтезагрязненных почв, на основании которой принимается решение о необходимости проведения рекультивационных работ почв и выбора мероприятий по их очистке. С другой стороны, Ставропольский край представляет регион с преобладающей долей производства сельскохозяйственной продукции. Поэтому остается вопрос оценки уровня загрязнения почв нефтепродуктами и восстановление их до состояния, безопасного для применения по основному виду хозяйственного использования - сельскохозяйственному. Отклик растений в вегетационном опыте может дать важные результаты нормирования содержания нефтепродуктов в почвах земель сельскохозяйственного назначения. До настоящего времени отсутствуют единые указания по выбору чувствительных показателей для нормирования нефтезагрязнения в почвах с учетом их характеристик и свойств, а также основного хозяйственного использования.

Цель работы - оценить реакцию высших растений (пшеницы и рапса) на разное содержание нефтепродуктов в почвах кашта-

нового ряда земель сельскохозяйственного использования в вегетационном опыте и сопоставить чувствительность оценочных показателей.

Объектами исследования послужили почвы засушливой зоны юго-восточной части Ставропольского края: светло-каштановые (Haplic Kastanozems Sodic) и лугово-каштановые слабозасоленные (Gleyic Kastanozems Chromic) [1, 2]. Пробы почв отбирались на незагрязненных нефтью земельных участках площадью $10 \times 10 \text{ м}^2$ методом конверта с глубины 0–20 см. Для оценки реакции растений на нефтяное загрязнение почв проводился вегетационный опыт. В эксперименте использована сырая нефть, добываемая в Ставропольском крае. В почвы вносили дозы сырой нефти (от 1,0 до 60,0 г/кг), основываясь на экспертном заключении об их возможной сорбционной способности нефтепродуктов с учетом содержания влаги в почве. Контрольным вариантом служил незагрязненный вариант почв.

Вегетационный опыт заложен по общепринятой методике [3] в трехкратной повторности. В качестве тест-культур выбраны однодольное растение яровая пшеница сорта Эстер и двудольное рапс яровой сорта Ратник. В эксперименте оценивали: всхожесть семян, биомассу сырую и сухую растений, массу зерен (семян), концентрацию хлорофилла и каротиноиды в растениях.

В исходных образцах почв определяли $\text{pH}_{\text{водный}}$ [4], влажность [5], содержание органического вещества почвы бихроматным методом [6], гранулометрический состав [7], нефтепродукты определены методом ИК-спектromетрии [8]. Биомасса растений оценена согласно [3]. В сырых растениях фотометрически на фотометре КФК 3-01, Россия, определяли хлорофилл и каротиноиды из 100% ацетоновой вытяжки [9].

Основные характеристики почв приведены в таблице 1. Светло-каштановая почва по гранулометрическому составу супесчаная. Уровень содержания гумуса в светло-каштановой супесчаной почве очень низкий. Лугово-каштановая почва характеризуется тяжелосуглинистым гранулометрическим составом, достаточная обеспеченность гумусом – между низкой и средней.

В лугово-каштановой почве отмечали стимуляцию роста как пшеницы, так и рапса (рис. 1А, 1Б). Это так называемое явление гормезиса. Зеленая и сухая биомасса пшеницы и рапса досто-

верно увеличивались при концентрации нефтепродуктов от 1 до 7 г/кг. Концентрации нефтепродуктов выше 7 г/кг приводили к достоверному снижению биомассы растений. Выявлено увеличение массы зерна пшеницы и семян рапса при дозе нефти от 1 до 12 г/кг, более высокие дозы нефти приводили к резкому снижению их веса. При этом рапс оказался более чувствительным к нефтепродуктам и при дозе нефтепродуктов в почве более 12 г/кг стручки с семенами не выросли.

Таблица 1. Основные физико-химические характеристики почв

Почвы	Почвенные частицы <0,01 мм	pHводн	Органическое вещество	Содержание нефтепродуктов
	%	ед. pH	%	г/кг
Светло-каштановая Haplic Kastanozems Chromic	13,13 супесчаная	8,7	0,94	0,20
Лугово-каштановая Gleyic Kastanozems Chromic	56,87 тяжелосуглинистая	8,7	3,95	0,16

В эксперименте с образцами светло-каштановой почвы также, как и в лугово-каштановой почве, при малых концентрациях нефтепродуктов отмечали стимуляцию роста пшеницы. Зеленая и сухая биомасса пшеницы увеличивались при концентрации нефтепродуктов от 1 до 4 г/кг. Концентрации нефтепродуктов выше 4 г/кг вызвали подавление роста пшеницы и рапса; и снижение как зеленой, так сухой биомассы. Биомасса рапса увеличивалась только в варианте с зеленой биомассой при концентрациях до 2 г/кг нефтепродуктов, тогда как сухая биомасса снижалась с увеличением их содержания.

Оценка массы зерна пшеницы показала устойчивое снижение массы зерна при содержании нефтепродуктов выше 7 г/кг в почве. Рапс оказался чувствительным к нефтепродуктам – стручки и семена на образовывались.

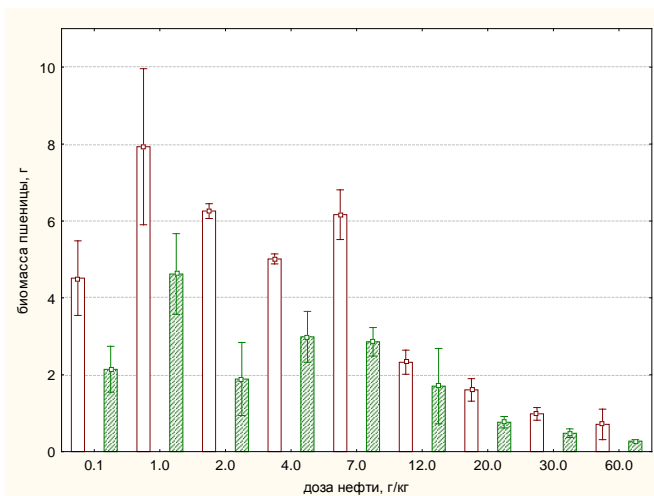


Рисунок 1 А. Изменение зеленой и сухой биомассы пшеницы/рапса на лугово-каштановой почве в зависимости от дозы внесённой нефти

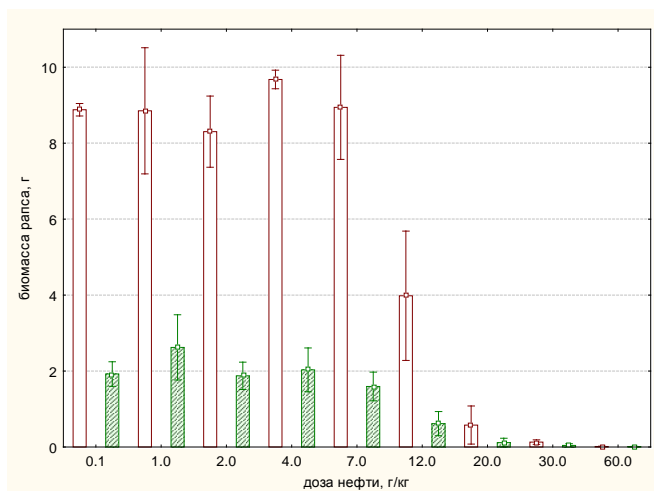


Рисунок 1 Б. Изменение зеленой и сухой биомассы пшеницы / рапса на лугово-каштановой почве в зависимости от дозы внесённой нефти

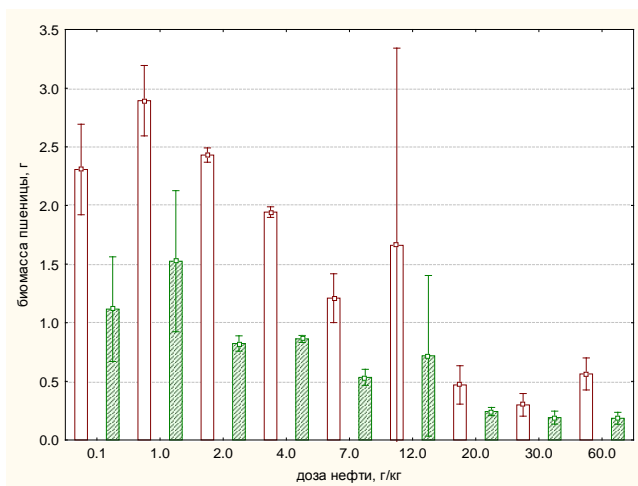


Рисунок 2 А. Изменение зеленой и сухой биомассы пшеницы/рапса на светло-каштановой почве в зависимости от дозы внесенной нефти

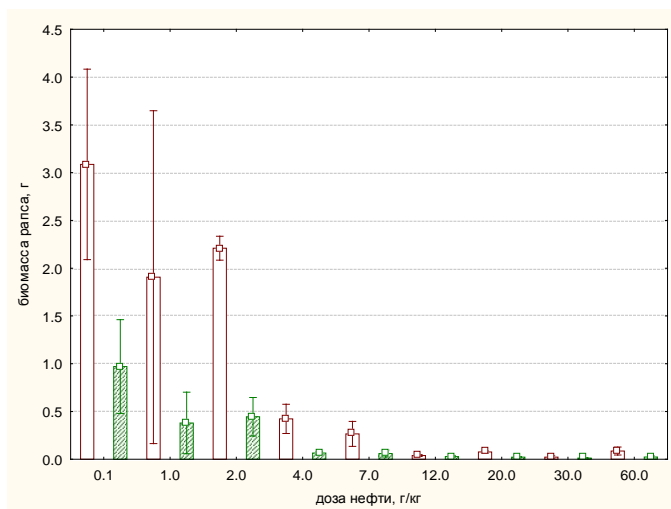


Рисунок 2 Б. Изменение зеленой и сухой биомассы пшеницы / рапса на светло-каштановой почве в зависимости от дозы внесенной нефти

Установлено по результатам вегетационного опыта, что при содержании нефтепродуктов более 7 г/кг в лугово-каштановых почвах происходит достоверное снижение биомассы пшеницы и рапса, концентрации хлорофилла а и b. В светло-каштановых почвах снижение биомассы пшеницы, концентрации хлорофилла а и b происходило при концентрации нефтепродуктов выше 4 г/кг. тогда как для рапса изменение этих показателей зафиксировано при концентрации нефтепродуктов выше 2 г/кг. Рапс проявил большую чувствительность к нефтяному загрязнению, нежели пшеница при выращивании на почвах каштанового ряда. Разные уровни допустимого безопасного содержания нефтепродуктов в изученных почвах по отношению к растениям объясняются сорбционной способностью и устойчивостью почв к воздействию. Проведенное исследование показало, что наилучшие оценочные параметры растений – зеленая и сухая биомасса растений, концентрации хлорофилла а и b для оценки и экологического нормирования нефтепродуктов в почвах каштанового ряда Ставропольского края. Концентрации каротиноидов не имели направленного изменения в зависимости от содержания нефтепродуктов в почве.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды»; государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 121040800147-0 «Почвенные информационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов»).

Литература

1. Классификация и диагностика почв СССР Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н. и др. (сост.) М.: «Колос», 1977. - 221 с.
2. FAO, 2015. World Reference Base for Soil Resources Rome.
3. Практикум по агрохимии» под редакцией академика РАСХ Минеева В. Г., МГУ, 2001.
4. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки.

5. ГОСТ 28268-89 Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений.
6. ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества.
7. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава
8. ПНДФ 16.1:2.2.22-98 «Методика измерения массовой доли нефтепродуктов в почве и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. Количественный химический анализ почв». 2005. 18 с.
9. Практикум по физиологии растений/Н. Н. Третьяков, Т. В. Карнаухова, Л. А. Паничкин и др. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Агропромиздат, 1990. —271 с: ил.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ПОЛИГОНА ТБО Г. РОСТОВА-НА-ДОНУ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА ЕГО БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Хранай Е.С., Кучерова А.В., Колесников С.И.

*Южный федеральный университет, Академия биологии
и биотехнологии им. И.В. Ивановского, Ростов-на-Дону, Россия
KaterinaP1996@mail.ru*

На сегодняшний день проблема переработки мусора еще не решена в нашей стране в полном объеме. И большинство полигонов твердо-бытовых отходов после длительного эксплуатирования рекультивируют.

Рекультивация процесс длительный и состоит из двух этапов. Первая стадия – техническая, в которую входит исследование и подготовка свалочного тела [13]. Производят нанесение различных технических слоев, в том, числе изолирование токсичных веществ. Следующая стадия — это этап биологической рекультивации, при которой производят комплекс агротехнических и фитомелиоративных мер для восстановления нарушенных земель [14].

От эффективности рекультивации зачастую зависит в какой степени будут загрязнены прилежащие территории и верхние почвенные слои, которые были использованы на последних этапах рекультивации, как плодородно-растительные слои.

Цель работы — исследовать влияние загрязнения тяжелыми металлами почвы рекультивированного полигона ТБО на территории г. Ростова-на-Дону.

В составе мусора, который сейчас составляет полигоны, множество различных загрязняющих веществ. В том, числе и тяжелые металлы. На данный момент к тяжёлым металлам относят те металлы, атомная масса которых больше, чем пятьдесят атомных единиц. Например, Hg, V, Fe, Cu, Co, Ni, Mn, Bi, Zn, Mo, Cr, Cd, Sn, Cu и др [10]. По данным Реймерса Н. Ф. к тяжёлым металлам относят элементы с плотностью более восьми г/см³ [12].

Существуют разные источники поступления ТМ в почву – природные и техногенные. К первым относят эрозии, вулкани-

ческую деятельность, а также выветривание минеральных и горных пород. Ко вторым относят автотранспорт, эксплуатация атомных станций и электростанций, добыча и переработка полезных ископаемых, промышленность, сельское хозяйство, эксплуатация полигонов твёрдых бытовых отходов, применение пестицидов и удобрений, фабрики, заводы и т. д. [1].

В почву ТМ сначала попадают в виде солей металлов, оксидов в растворимых и нерастворимых формах [3]. Но в процессе техногенного воздействия соли металлов в почве переходят в состояние свободных металлов. При взаимодействии с кислородом свободные металлы могут быстро растворяться и мигрировать в почву на не загрязнённые территории. Высокое содержание органического гумуса и тяжелый гранулометрический состав помогают тяжелым металлам соединяться почвой и таким образом происходит их накопление в почвенном покрове. Затем происходит загрязнение сопредельных сред. В итоге ТМ включаются в состав органелл растений и животных и далее в глобальные круговороты веществ [11].

При изучении свойств чернозема обыкновенного при загрязнении тяжелыми металлами замечены значительные ухудшения свойств и биологических показателей исследуемой почвы [6-9].

Объектами исследования являются: почвы, отобранные на рекультивированной несанкционированной свалке ТБО в г. Ростове-на-Дону и чернозём обыкновенный южно-европейской фации (североприазовский) карбонатный слабогумусированный с прилежащих к ней территорий [2]. Всего было отобрано 13 проб верного горизонта 0–20 сантиметров: 1 – 8 на территории свалки, 9 – 11 севернее, 12 – 13 западнее полигона. Данная несанкционированная свалка находится в непосредственной близости от крупного жилого комплекса и практически прилегает садоводческому товариществу.

Для изучения влияния тяжелых металлов на биологические показатели почв были выбраны следующие методы исследования: валовое содержание тяжелых металлов изучалось с помощью рентгенофлуоресцентного метода, активность каталазы исследовалась по скорости распада перекиси водорода до молекулярного кислорода и воды [5], активность дегидрогеназ по скорости превращения хлорида трифенилтетразолия в трифенилформазан, активность инвертазы по скорости распада сахарозы до глюкозы, общая численность бактерий в почве по методу

прямой люминесцентной микроскопии, фитотоксичности почв по всхожести семян редиса и длине корней, проросших семян.

В результате исследования установлено, что почвы полигона значительно загрязнены тяжёлыми металлами по сравнению с естественными фоновыми показателями чернозёма обыкновенного. Во многих образцах, отобранных на территории полигона содержание ТМ превышает ПДК в несколько десятков. Превышение предельно допустимых концентраций установлены для: меди (Cu) превышение ПДК в почвах полигона до 40 раз, никель (Ni) до 7 раз, цинк (Zn) до 45 раз, хром (Cr) до 15 раз. Все проведенные исследования биологических показателей почвы дают снижение в почвах отбора почвы с полигона. Чаще всего прослеживается взаимосвязь: увеличение валового содержания металла и снижение биологических показателей. С помощью корреляционного анализа было выявлено, что тесные (сильные) отрицательные корреляции между снижением биологического показателя и повышением валового содержания металла были у исследования активности фермента каталазы и несколько ниже этот показатель у фитотоксичности – прорасти семян редиса и длины их корней. Данные биологические показатели отразили свою чувствительность и информативность.

Литература

1. Бирагова Н.Ф. Основные источники поступления тяжелых металлов в окружающую среду (РСО-Алания) // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – №. 6. – С. 35-36.
2. Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С. И. Почвы Ростовской области //Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета. – 2012;
3. Горбатов В.С. Устойчивость и трансформация оксидов тяжелых металлов (Zn, Pb, Cd) в почвах // Почвоведение. 1988. № 1. С. 35-43.
4. Елисеева Н.В., Федоренко К.А. Экология и возможная рекультивация свалок ТБО (на примере МО Белореченский район Краснодарского края) //Известия Сочинского государственного университета. – 2013. – №. 2. – С. 63-68.
5. Казеев К.Ш., Колесников С. И. Биодиагностика почв: методология и методы исследований. – Ростов н/Д: ЮФУ, 2012–260 с.

6. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В. Ф. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на эколого-биологические свойства чернозема обыкновенного //Экология. – 2000. – №. 3. – С. 193-201.
7. Колесников С.И., Вардуни В.М., Тимошенко А.Н., Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Оценка экотоксичности наночастиц оксидов кобальта, меди, никеля и цинка по биологическим показателям состояния чернозема обыкновенного. Юг России: экология, развитие. 2020. №15(1). С. 130—136.
8. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжелыми металлами. Почвоведение. 2002. № 12. С. 1509—1514.
9. Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Мясникова М.А. Оценка экотоксичности наночастиц меди, никеля и цинка по биологическим показателям чернозема. Почвоведение. 2019. № 8. С. 986—992.
10. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении: учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2002.
11. Перязева Е.Г. Миграция тяжелых металлов в окружающей среде // Экология и промышленность России. - 2001. - № 10. - С. 29-31.
12. Реймерс Н.Ф. Природопользование. – М.: Мысль, 1990. - 628 с.
13. Чибрик Т.С. Основы биологической рекультивации // Екатеринбург: Издательство Уральского университета. – 2002, 19 с.
14. Шукель П.В. Сенькова Л.А. Проблематика рекультивации земель, загрязнённых бытовыми отходами//Екатеринбург: Издательство Уральского государственного аграрного университета. – 2016.

АДСОРБЦИЯ ИОНОВ МЕДИ КАОЛИНИТОМ, МОДИФИЦИРОВАННЫМ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТАМИ

Чернов В.Е.¹, Киушов А.А.¹, Якименко О.С.², Панова И.Г.¹

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
химический факультет¹ и факультет почвоведения², Москва, Россия
slavachernov111@yandex.ru*

Воздушная и водная эрозия способствуют стремительной деградации почвенного покрова, приводя к разрушению почвенной структуры, выносу питательных элементов и, как следствие, ухудшению физических свойств почвы и ее плодородия [1, 2]. Не менее серьезной проблемой является загрязнение почв токсикантами промышленного назначения, в том числе ионами тяжелых металлов, аккумулирующихся в верхнем почвенном слое [3]. Поэтому, поиск эффективных и быстродействующих подходов к борьбе с последствиями эрозионных процессов и техногенного загрязнения имеют особую актуальность.

Эффективным методом борьбы с эрозией является использование водорастворимых полиэлектролитов (ПЭ), способных структурировать почву, препятствуя разрушению почвенных агрегатов [4]. Помимо индивидуальных полимеров предложено использовать полиэлектролитные комплексы (ПЭК), индивидуальные соединения, являющиеся продуктом кооперативного взаимодействия двух противоположно заряженных ПЭ [4]. Нанесенные поверх верхнего слоя почвы полимеры обеспечивают формирование защитной полимерно-почвенного покрытия, устойчивого к эрозии. При этом известно, что ПЭ при попадании в почву преимущественно взаимодействуют с наиболее активными ее компонентами – глинистыми минералами [5]. Глины, природные алюмосиликаты, во многом определяют способность почвы к прочному закреплению металлов, к снижению их миграционной способности и биологической доступности [6]. Представляло интерес выяснить, как модификация полимерами повлияет на способность глинистых минералов связывать тяжелые металлы.

Цель работы заключалась в определении параметров адсорбции ионов меди на частицах природного каолинита до и

после его модификации положительно заряженными полиэлектролитами. В качестве ПЭ использовали природные гидрофильные макромолекулы: хитозан и полиэлектролитный комплекс хитозан-гуматы калия, характеризующийся избытком поликатиона. Хитозан (Sigma-Aldrich, США), сополимер β -(1 \rightarrow 4)-2-ацетиамидо-D-глюкозы и β -(1 \rightarrow 4)-2-амино-D-глюкозы, является единственным природным поликатионом. Хитозан не токсичен, не имеет запаха, биосовместим и биоразлагаем. Анионные гуматы калия (ГумК) (Humintech GmbH, Германия), выделяемые из торфа/угля, представляют собой естественные органические компоненты самой почвы и используются в качестве удобрений и иммуностимуляторов растений. В качестве модельного алюмосиликата использован каолинит (Sigma-Aldrich, США), один из базовых почвообразующих минералов. В качестве модельного тяжелого металла использована медь. Выбор в качестве тестовых катионов ионов меди обусловлено тем, что широкое применение этого металла в промышленности в настоящее время приводит к его прогрессивному накоплению в окружающей среде.

В слабокислой среде (рН 5,4) между отрицательно заряженными карбоксильными группами ГумК ($-\text{COO}^-$), и положительно заряженными аминогруппами хитозана, ($-\text{NH}_3^+$), происходит электростатическое взаимодействие. В результате формируются поликомплексы хитозан/ГумК, стабилизированные солевыми связями между ионными группами обоих полиэлектролитов. При полной компенсации зарядов в смеси наблюдается формирование осадка водонерастворимого стехиометрического ПЭК. Устойчивыми к фазовому разделению оказались нестехиометрические ПЭК с большим зарядовым избытком одного из компонентов, формирующиеся при мольном соотношении катионных и анионных групп $[\text{NH}_3^+]/[\text{COO}^-] \leq 0,15$ и $[\text{NH}_3^+]/[\text{COO}^-] \geq 5$. Для модификации глины был использован катионный ПЭК с двухкратным избытком заряда хитозана, $[\text{NH}_3^+]/[\text{COO}^-] = 5$.

Взаимодействие каолинита с нативным хитозаном изучали методом лазерного микроэлектрофореза, регистрируя по ЭФП появление несвязанных макромолекул поликатиона в надосадочной жидкости в смесях “каолинит-хитозан” с постоянным содержанием глины и увеличивающейся концентрацией полимера (рис.1.).

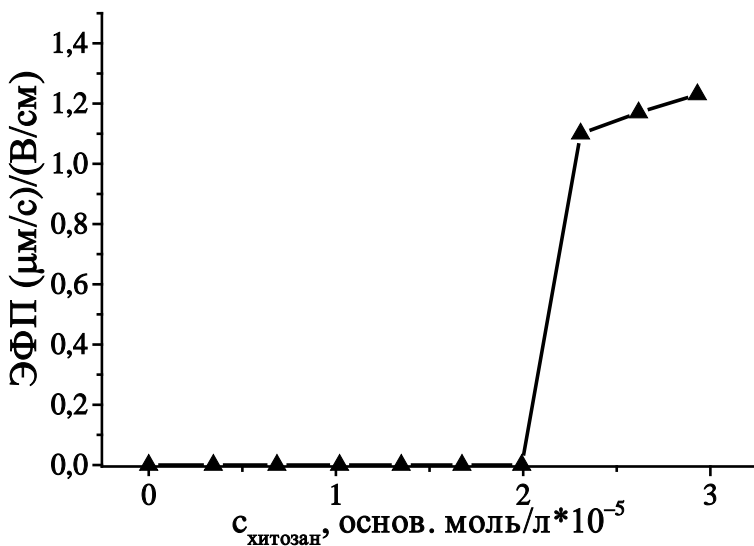


Рисунок 1. Изменение ЭФП в надосадочной жидкости, полученной после осаждения глины из 0,5 вес.% суспензии каолинита в зависимости от концентрации добавленного хитозана. Ацетатно-фосфатный буфер (0,4% $\text{CH}_3\text{COOH}/0,1\text{M NaH}_2\text{PO}_4$), pH = 5,4

Использованный подход свидетельствовал о количественном взаимодействии поликатиона и частиц глины; предельная адсорбция составила 1,1 мг хитозана/ 1 г минерала.

Адсорбцию ПЭК на частицах каолинита изучали методом УФ-спектроскопии. Окрашенный из-за присутствия гуматов поликомплекс характеризовался максимальным поглощением при $\lambda = 350$ нм. Зависимость несвязанного каолинитом катионного ПЭК от его содержания в 4 % глинистой суспензии представлена на рис. 2. Вплоть до концентрации сПЭК = 0,026 % в надосадочных растворах комплекс практически отсутствовал. Подобный результат свидетельствует о количественном связывании катионного ПЭК вплоть до полного насыщения каолинита полимером. Предел адсорбции составил – 6,25 мг ПЭК/ 1 г минерала.

Количественный характер связывания обоих поликатионов с глиной позволил получить образцы каолинита, модифицированные хитозаном и поликомплексом хитозан/Гум в условиях максимального насыщения алюмосиликата полиэлектролитами.

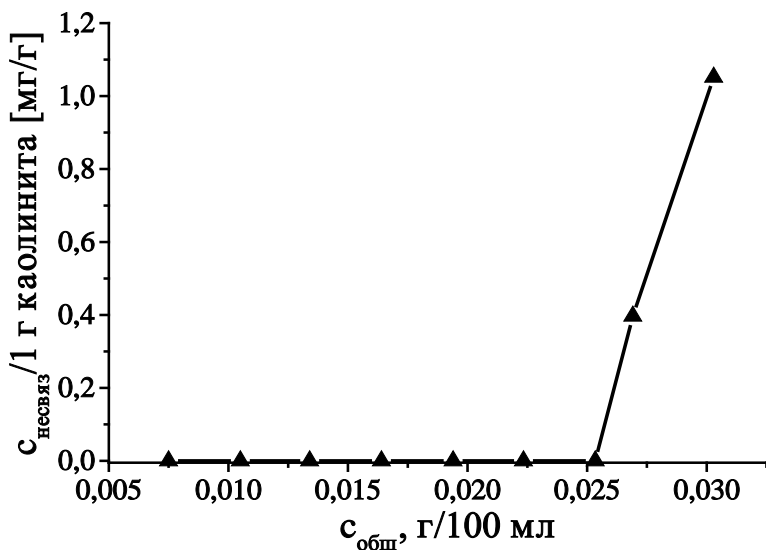


Рисунок 2. Зависимость количества несвязанного каолинитом катионного ПЭК ($Q = 5$ (+)) от концентрации ПЭК в 4 % суспензии минерала. Ацетатно-фосфатный буфер (0,4% $\text{CH}_3\text{COOH}/0,1\text{M}$ NaH_2PO_4), $\text{pH} = 5,4$.

Содержание несвязанных ионов меди в надосадочных растворах в равновесных системах “каолинит- CuSO_4 ” определяли методом УФ-спектроскопии, предварительно переведя металл в аммиачный комплекс. Количество связанной меди определяли по разности между ее содержанием в исходном и равновесном растворах. На рис. 3 представлены изотермы адсорбции, полученные для нативного каолинита (КЛТ) (кривая 1), каолинита, модифицированного хитозаном (кривая 2), и каолинита, модифицированного поликомплексом (кривая 3). Полученные кривые отражают зависимости количества меди, сорбированной глиной (Γ^*), от начальной концентрации меди в суспензии каолинита.

Изотермы имеют различную форму, которая определяется характером взаимодействия адсорбата с адсорбентом. Для нативного каолинита и каолинита, модифицированного поликомплексом, кривые приближались к классической форме изотерм Ленгмюра с одним выходом на плато (пределом насыщения) для КЛТ-ПЭК и двумя выходами на плато для КЛТ. Для каолинита, модифицированного хитозаном, предел насыщения по меди достигнут не был.

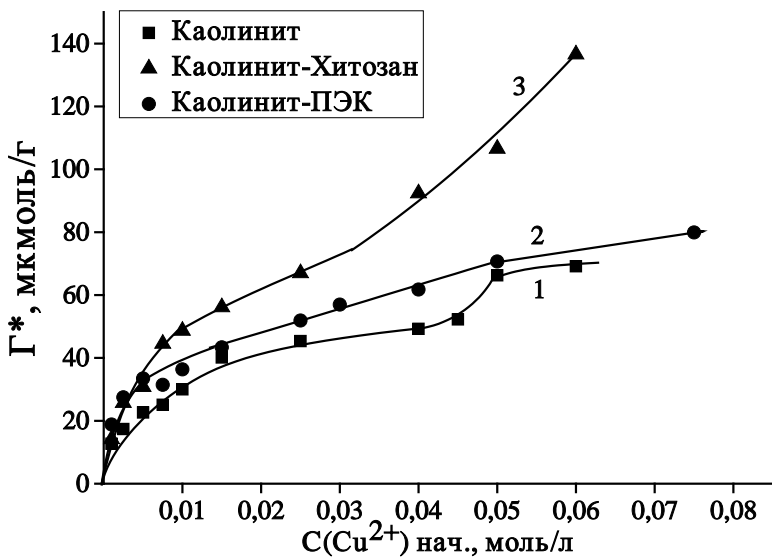


Рисунок 3. Изотермы адсорбции Cu^{2+} на каолините при pH 6,5.

Математическую обработку полученных экспериментальных зависимостей и оценку характеристических параметров адсорбции проводили с использованием двух моделей, Ленгмюра и Фрейндлиха.

Модель Ленгмюра описывает ограниченную адсорбцию. Обработку экспериментальных кривых проводили для участка, характеризующего выход на первое плато изотермы сорбции для каолинита, то есть до вплоть до 0,04 М/л исходного раствора ионов меди. Определение констант Γ_m^* и A проводили графически с использованием линейного уравнения:

$$\frac{1}{\Gamma^*} = \frac{1}{\Gamma_m^*} + \frac{1}{A\Gamma_m^*} * \frac{1}{C},$$

где Γ_m^* – удельная адсорбция в предельно заполненном слое, A – константа адсорбционного равновесия, C – концентрация адсорбата.

Рассчитанные значения предельной адсорбции и константы адсорбции для всех трех типов сорбентов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры Ленгмюровской адсорбции Cu^{2+} на каолините.

Сорбент	Γ_{m}^* , мкмоль/г	A, 1/М
Чистый каолинит	$39,1 \pm 5,7$ ($\pm 14,6\%$)	$438,9 \pm 93,2$ ($\pm 21,2\%$)
Каолинит, модифицированный хитозаном	$69,8 \pm 7,9$ ($\pm 11,3\%$)	$247,8 \pm 33,0$ ($\pm 13,3\%$)
Каолинит, модифицированный ПЭК	$47,5 \pm 4,5$ ($\pm 9,4\%$)	$629,5 \pm 102,0$ ($\pm 16,2\%$)

Полученные данные указывают на большее количество активных центров в каолините, модифицированном хитозаном и, при этом, на значительно большее сродство этого сорбента к ионам меди по сравнению с природным каолинитом. Высокая относительная погрешность полученных значений указывает на то, что данная модель приближенно описывает адсорбционные процессы в использованных системах “Каолинит-медь”. Это может быть вызвано как неоднородностью поверхности многослойного глинистого минерала, так и участием в связывании нескольких видов адсорбционных сайтов с различной активностью в отношении ионов металла.

Модель Фрейндлиха используют для количественного описания адсорбции на энергетически неоднородных, многослойных или пористых поверхностях с неограниченным количеством адсорбционных центров, основываясь на эмпирическом линейном уравнении:

$$\Gamma^* = K_F C^q,$$

где K_F – значение адсорбции при равновесной концентрации адсорбата, равной единице

($C = 1 \text{ M}$), q – константа, характеризующая отклонение от линейной зависимости.

Обработку экспериментальных кривых проводили для всего изученного диапазона концентраций меди в исходном растворе. Рассчитанные значения адсорбционной емкости и константа, характеризующая отклонение от линейной зависимости, для всех трех типов сорбентов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры адсорбции Cu^{2+} на каолините по модели Фрейндлиха.

Сорбент	$K_F \times 10^{-5}$	q
Чистый каолинит	$20,0 \pm 2,0$ ($\pm 9,2\%$)	$0,42 \pm 0,02$ ($\pm 4,8\%$)
Каолинит, модифицированный хитозаном	$50,0 \pm 5,0$ ($\pm 10,2\%$)	$0,51 \pm 0,02$ ($\pm 4,3\%$)
Каолинит, модифицированный ПЭК	$18,0 \pm 2,0$ ($\pm 9,2\%$)	$0,33 \pm 0,02$ ($\pm 6,0\%$)

На основании анализа полученных параметров можно отметить, что каолинит, модифицированных хитозаном, проявляет самую высокую адсорбционную активность при извлечении ионов меди из водных растворов. Модификация поликомплексом не привела к существенным изменениям в сорбционной эффективности глинистого минерала. Величину q можно рассматривать как показатель неоднородности сорбционных центров: по мере возрастания неоднородности $q \rightarrow 0$, а при увеличении однородности центров $q \rightarrow 1$. Отсюда следует, что после модификации каолинита хитозаном однородность адсорбционных сайтов повышается, в то время как после модификации ПЭК - понижается.

Более низкая относительная погрешность полученных значений параметров сорбции указывает на то, что модель Фрейндлиха наиболее адекватно описывает общую картину адсорбции ионов меди на частицах нативного и модифицированного полиэлектролитами каолинита. Полученные результаты подтверждают участие в адсорбции разнообразных видов сайтов с различной активностью в связывании ионов металла.

Таким образом, установлено, что по адсорбционной емкости минерал-органические сорбенты образуют ряд Каолинит \leq Каолинит-ПЭК < Каолинит-Хитозан. То есть, связывание полиэлектролитов с глинистым сорбентом не ухудшает, а даже может способствовать улучшению связывающей способности полимер-минерального композита за счет появления новых более активных центров.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-13.

Литература

1. Цветнов Е.В., Марахова Н.А., Макаров О.А., Строков А.С., Абдулханова Д. Р. Апробации подхода к определению общественной ценности земель в качестве основы для проведения эколого-экономической оценки ущерба от их деградации // Почвоведение. 2019, 10, с. 1269-1277.
2. Хитров Н.Б., Иванов А.Л., Завалин А.А., Кузнецов М. С. Проблемы деградации, охраны и пути восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения // Вестник аграрной науки. 2007, 9, с. 29-32.
3. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Самохин А.П., Статовой А.А. Поглощение меди, цинка и свинца черноземом обыкновенным при моно-и полиэлементном загрязнении // Агрохимия. 2005, 8, с. 58-64.
4. Панова И.Г., Ильясов Л.О., Ярославов А.А. Поликомплексные рецептуры для защиты почв от деградации // Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2021, 63, с. 232-244.
5. Green V.S., Stott D.E., Graveel J.G., Norton L.D. Stability analysis of soil aggregates treated with anionic polyacrylamides of different molecular formulations // Soil Science. 2024, 20041698, p. 573-581.
6. Otunola B.O., Ololade O.O. A review on the application of clay minerals as heavy metal adsorbents for remediation purposes // Environmental Technology & Innovation. 202018, 100692.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТОВ И ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНЫХ КОМПЛЕКСОВ НА СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИРОДНОГО КАОЛИНИТА

Киушов А.А.¹, Молчанов В.С.², Якименко О.С.³, Панова И.Г.¹

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,

¹Химический факультет, ²Физический факультет,

³Факультет почвоведения, Москва, Россия

akiushov1@yandex.ru

Современное общество сталкивается со множеством вызовов, среди которых можно выделить проблемы деградации почв, обусловленные водной и ветровой эрозией. Интенсивное использование почвенных ресурсов приводит к ускорению протекания эрозионных процессов. По некоторым оценкам площадь земель в том, или ином виде подверженных деградации составляет 3,5 млрд га, или 23% земельного фонда доступного человеку, из них водной эрозии подвержены около 1,1 млрд га, или 56% пахотных земель. Таким образом, важной задачей является поиск и разработка новых, а также усовершенствование ранее предложенных методов борьбы с эрозионными процессами. Среди существующих методов, перспективными являются химические, в частности, использование полиэлектролитов и полиэлектролитных комплексов, продуктов кооперативного взаимодействия противоположно заряженных макромолекул. Целью данной работы является изучение влияния полиэлектролитов и полиэлектролитных комплексов на структурно-механические свойства природного почвообразующего глинистого минерала, каолинита. В качестве полимерных модификаторов были использованы линейный синтетический поликатион, поли(диаллилдиметиламмоний хлорид) (ПДАДМАХ), и природные поли-

анионы, гуматы калия (ГумК), а также поликомплексы (ПЭК) на их основе.

Изучено взаимодействие двух противоположно заряженных полиэлектролитов (ПЭ) в нейтральной слабо-солевой среде (0,001 М фосфатный буфер, рН = 6,5). Определены составы и агрегативная устойчивость образующихся поликомплексов, включая стехиометрический состав, соответствующий равенству количества заряженных функциональных групп обоих полиэлектролитов ($Q = [-N^+]/[-COO^-] = 1$). С помощью методов лазерного микроэлектрофореза и УФ-спектрометрии исследованы адсорбционные параметры ПЭ и их нестехиометрических ПЭК на глинистом минерале, каолините. Методом РФА показано, что ПЭ не влияют на структуру глинистого минерала.

Оценка влияния ПЭ и ПЭК на реологические свойства увлажненного до капиллярного насыщения каолинита проводилось с помощью метода динамической амплитудной развертки в осциллярном режиме деформации. Получены зависимости реологических параметров (ϵ , G') от массовой доли модификатора (ПДАДМАХ, ГумК, катионного и анионного ПЭК различного состава в диапазоне от 0,01 до 1 – 1,5 вес.%* (*-массовая доля ПЭ относительно массы сухого глинистого минерала). Показано, что в случае химической модификации ПДАДМАХ значения модуля накопления (упругости) увеличиваются на порядок и проходят через локальный максимум, соответствующий массовой доли модификатора – 0,45 вес.%. Одновременно с этим наблюдается снижение деформации, соответствующей точки кроссовера системы (точке перехода от вязкоупругого поведения к вязко-текучему). Обратная ситуация наблюдается для анионных ГумК, где происходит снижение модуля накопления на 2 порядка при одновременном увеличении области вязкоупругого поведения (увеличение значений деформации в точке кроссовера). Полиэлектролитные комплексы, аналогично поликатиону, оказывают упрочняющее действие на увлажненный минерал, но с менее выраженным эффектом.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-13

УГНЕТЕНИЕ ТРАВЯНИСТЫХ РАСТЕНИЙ НА ЗАФОСФАЧЕННЫХ ПОЧВАХ МОСКВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РЕМЕДИАЦИИ

Роберт А.Э.

*Российский Университет Дружбы Народов им. Патриса Лумумбы,
Москва, Россия
agrochemmsu@gmail.com*

В настоящий момент всё большее количество людей концентрируются в мегаполисах. Одним из негативных факторов, воздействующих на растения в городской среде, является накопление и избыточное содержание подвижных соединений фосфора в почвах и техногенных поверхностных образованиях.

Способность высоких концентраций подвижного фосфора вызывать нарушения в растениях активно изучается в настоящее время. Описано негативное воздействие фосфора как при его избыточном внесении в качестве удобрений, так и избыточном содержании в почве или почвоподобном теле [2, 3, 5].

Избыточное содержание фосфора может угнетать развитие растений различными путями, например:

1. Снижая доступность микроэлементов для растений [6, 7]
2. Повышая доступность тяжелых металлов – например, мышьяка [4]
3. Повышая восприимчивость растений к болезням [7, 8]
4. Снижая поглощение воды корнями растений [6] и усиливая действие солевого стресса [1].

Гипотеза нашего исследования – подвижные соединения фосфора, которые в высоких концентрациях накапливаются в техногенных поверхностных образованиях и почвах Москвы, оказывают негативное воздействие на травянистые растения.

Для оценки негативного воздействия высоких концентраций подвижных соединений фосфора в почвах и техногенных поверхностных образованиях Москвы на травянистые растения был заложен вегетационный опыт, результаты которого будут представлены в развернутом виде.

Дальнейшее направление работы включает в себя подбор и апробацию различных методов ремедиации зафосфаченных почв.

Литература

1. Cocozza C. et al. The excess of phosphorus in soil reduces physiological performances over time but enhances prompt recovery of salt-stressed *Arundo donax* plants // *Plant physiology and biochemistry*. – 2020. – Т. 151. – С. 556-565.
2. Ivashchenko K. et al. Microbial C-availability and organic matter decomposition in urban soils of megapolis depend on functional zoning // *Soil & Environment*. – 2019. – Т. 38. – №. 1.
3. Jing X. et al. Neutral effect of nitrogen addition and negative effect of phosphorus addition on topsoil extracellular enzymatic activities in an alpine grassland ecosystem // *Applied Soil Ecology*. – 2016. – Т. 107. – С. 205-213.
4. Wu J. et al. Phosphorus-arsenic interaction in the 'soil-plant-microbe' system and its influence on arsenic pollution // *Science of the Total Environment*. – 2022. – Т. 802. – С. 149796.
5. Yoneyama K. et al. Nitrogen and phosphorus fertilization negatively affects strigolactone production and exudation in sorghum // *Planta*. – 2013. – Т. 238. – №. 5. – С. 885-894.
6. Загорулько А. В. и др. Эколого-агрономическая оценка действия химических средств земледелия на урожай и качество зерна озимой пшеницы // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2017. – №. 131. – С. 1405-1424.
7. Кирис Ю. Н. и др. Экологический мониторинг коллекции сирени ботанического сада МГУ. Влияние избыточного внесения фосфатов на почву и растения сирени обыкновенной (*Syringa vulgaris* L.) // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. – 2021. – №. 1. – С. 64.
8. Терехова В.А. и др. Экотоксикологическая оценка повышенного содержания фосфора в почвогрунте по тест-реакциям растений на разных стадиях развития // *Проблемы агрохимии и экологии*. – 2009. – №. 3. – С. 21-26.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПОЛИКОМПЛЕКСНЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ ДЛЯ ПОЧВ И ГРУНТОВ

*Ярославов А.А.
Приглашенный лектор*

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
химический факультет, Москва, Россия
yaroslav@belozersky.msu.ru*

Аннотация

Доклад посвящен новым связующим на основе интерполимерных комплексов (поликомплексам) для природных дисперсных систем, в том числе почв и грунтов. Суть предлагаемого метода состоит в нанесении на обрабатываемую поверхность разбавленных водных растворов полимеров, которые способны быстро реагировать друг с другом и частицами почвы (грунта) непосредственно в закрепляемом слое. В результате получается нерастворимое в воде вяжущее, которое обладает превосходными закрепляющими свойствами и совершенно нетоксично. Структурированная поликомплексными рецептурами поверхность устойчива к ветровой и водной эрозии; разрушенная поверхность полностью восстанавливает свои свойства при увлажнении почвы (искусственный полив, природные осадки).

В докладе обсуждаются фундаментальные аспекты реакций, приводящих к формированию поликомплексам, их структура, механизм действия и свойства, которые делают поликомплекс эффективными и универсальными связующими.

ФИНАНСОВЫЕ ПАРТНЕРЫ ФОРУМА



Фонд поддержки производителей органической продукции (Фонд «Органика»)

создан в сентябре 2021 года по инициативе АО Россельхозбанк».

Миссия Фонда – содействие формированию культуры потребления органической продукции.

Основные направления деятельности Фонда «Органика»:

- Активация потребительского спроса на органическую продукцию.
- Развитие каналов сбыта.
- Поддержка производителей органической продукции.
- Развитие партнерских отношений.

Для активации потребительского спроса Фонд организует конкурс среди школьников на знание темы органической продукции с целью стимулирования интереса аудитории образовательных организаций к органической продукции; занимается популяризацией органики, ведет соцсети и RuTube-канал. На сайте Фонда (<https://organicfund.ru/>) также функционирует Информационный портал органики (<https://organicfund.ru/potrebitelyam/informacionnyi-portal-organiki/>), где можно найти самую актуальную информацию обо всех российских производителях органической продукции, каналах сбыта, биопрепаратах, разрешенных в органическом сельском хозяйстве, о производителях сельхозтехники и многое другое!

С целью развития каналов сбыта Фонд выступает финансовым партнером и соорганизатором таких конкурсов, как WorldFood Organic и Конкурс на соискание премии за достижения в развитии российской органической продукции (<https://roskachestvo.gov.ru/organic/contest/>); является партнером таких фестивалей как «Хутор Фест» в Ростовской области и Organic Summer в Санкт-Петербурге.

С целью поддержки производителей органической продукции Фонд проводит конкурс грантов на сертификацию органической продукции; организует стажировки для производителей на базе органических хозяйств России и зарубежья, формирует коллективные стенды производителей органической продукции на отраслевых выставках, как WorldFood Moscow (<https://world-food.ru/>), «ЭкоГородЭкспо» (<https://ecogorod-expo.ru/>), «Золотая осень» (<http://goldenautumn.moscow/>), которые традиционно проходят ежегодно.

Фонд активно развивает партнерские отношения с отраслевыми союзами, ассоциациями, производителями органики, выступает местом встречи экспертов отрасли.

Подробнее узнать о деятельности Фонда можно в соцсетях!

<https://vk.com/organicfund>

<https://t.me/organicfundru>

<https://rutube.ru/channel/25582422/>



ООО «Иннагро» — создано в 2021 году Фондом «Национальное интеллектуальное развитие» (бренд «Иннопрактика»). Компания занимается управлением программой испытаний инновационных препаратов для устойчивого сельского хозяйства, а также реализует биологические средства защиты растений, кормовые пробиотические добавки для животных и птицы, биоконсерванты для заготовки и другие разработки ведущих российских ученых. Миссия компании — развитие биологизации агропромышленного комплекса России посредством продвижения микробиологических разработок.



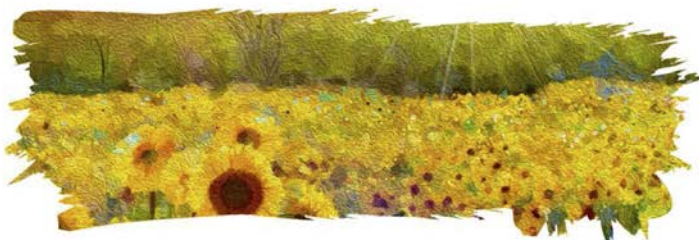
иннагро

**Инновационные российские препараты
для устойчивого сельского хозяйства**

Плантарел, ВР

На основе супрамолекулярного комплекса коллоидного серебра и биологически активного полимера

Универсальный стимулятор роста с фитопротекторным действием



до **50%** снижение фунгицидной нагрузки на агроценозы

до **25%** повышение урожайности

до **97%** защита от болезней

ООО «Иннагро», ОГРН 1217700123970. Плантарел, ВР: регистрационный номер 734-07-3223-1 до 14.07.2031. Указанные данные об эффективности препарата опираются на результаты 600+ испытаний в 35 регионах России.

+7 495 795 74 53 www.innagro.ru
+7 967 128 46 67 info@innagro.ru





Компания ЛИГНОГУМАТ специализируется на производстве регуляторов роста растений для сельскохозяйственного производства, на основе гуминовых и фульвокислот.

Препараты, выпускаемые компанией Лигногумат, сочетают все достоинства стимулятора и антистрессанта. Они представляют собой сухой порошок (8-10% влажности) или жидкую форму (концентрация до 20%).

Лигногумат используется для комплексных обработок растений на всех стадиях: как посевного или посадочного материала, так и вегетирующих растений.

Лигногумат позволяет снизить расходы на восстановление и подготовку почвы, повысить урожайность и качество сельскохозяйственных продуктов. Более 15 000 000 га в мире сегодня обрабатывают Лигногуматом.

Наши экологически чистые препараты, изготовленные по запатентованной технологии гумификации растительного сырья, 100% растворимы и имеют самую высокую концентрацию на рынке промышленных гуматов.

Мы выпускаем:

- Сухую модификацию с 900 г/кг действующего вещества;
- Жидкую с концентрацией до 220 г/литр высокоактивных гуминовых веществ.

Использование современных технологий на основе наших препаратов для обработки семян и посадочного материала, а также агрокультур на всех этапах развития позволяет в значительной мере повысить урожайность и добиться улучшения структуры почвы.

Сайт: www.lignohumate.ru





ООО "ЕВРОПОЛИТЕСТ" – отечественный производитель оборудования для экологического мониторинга окружающей среды, в частности для автоматизации биотестов под торговыми названиями:

- Климатостаты (P2, B2, B3, B4)
- Культиваторы серии KB (05, 06, 07, 08)
- Культиваторы серии KBM (05, 06, 07, 08)
- Устройства экспозиции серии УЭР (03, 04, 05)

- БиоЛаТ – автоматизированный программно-технический комплекс биотестирования
- Измеритель плотности суспензии водоросли серии ИПС (ИПС-03)
- Флуориметр изучения флуоресценции хлорофилла серии «Фотон» (Фотон-10)

Сегодня компания выпускает обновленные климатостаты серии «Р» и «В» в которых улучшены технические характеристики и значительно расширены функциональные возможности. Компания открыта к сотрудничеству со всеми российскими учеными, работающими в области биотестирования.

Новые разработки уже замечены и признаны. За 2021 и 2022 годы поставлено более сорока климатостатов, производства ООО «Европолитест» с сенсорным управлением и более ста приборов других типов и моделей.



Продукция компании представлена в народном каталоге лабораторной продукции российского и белорусского производства, подготовленном командой глобального российского проекта «НАША ЛАБА».

Вся производимая продукция выпускается по собственным техническим условиям и конструкторской документации, сертифицирована на соответствие ТУ, задекларирована на соответствие регламенту таможенного союза. Испытательное оборудование поставляется с программой и методикой аттестации, проходит первичную аттестацию, поставляется с протоколом и аттестатом первичной аттестации. Средства измерения внесены в государственный реестр средств измерений и поставляются с первичной поверкой.

Предлагаются поставки как комплектов оборудования, так и отдельных его частей, инструктаж пользователей на предприятии заказчика или организация курсов повышения квалификации на базе ЛЭТАП МГУ или ООО «Акварос», Москва.

ООО «Европолитест» готово сотрудничать с региональными представителями.

ООО «Европолитест» предоставляет полный комплекс услуг по решению проблем биотестирования в экоаналитических лабораториях:

- оборудование для биотестирования
- методики биотестирования
- обучение пользователей
- установка оборудования на местах
- гарантийное и сервисное сопровождение.

По всем вопросам обращайтесь в ООО «Европолитест»

Тел./факс: (499) 500 14 28 E-mail: info@europolytest.ru

Моб. Тел.: (903) 208 19 28 E-mail: europolytest@mail.ru

Контактное лицо: Ермаков Алексей Евгеньевич



ФосАгро – российская вертикально-интегрированная компания, один из ведущих мировых производителей фосфорсодержащих удобрений.

Наша экологически безопасная продукция помогает повышать объемы и качество урожая фермерам в порядка 100 странах мира на всех обитаемых континентах. Мы производим более 57 марок минеральных удобрений, аммиак и кормовые фосфаты, высокосортное фосфатное сырье с содержанием P_2O_5 39% и более (апатитовый концентрат).

В Группу «ФосАгро» входят АО «Апатит» в Череповце (Вологодская обл.), его филиалы в Кировске (Мурманская обл.), Балаково (Саратовская обл.) и Волхове (Ленинградская обл.), ООО «ФосАгро-Регион» и АО «Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам имени профессора Я.В.Самойлова».

Сайт: <https://www.phosagro.ru/>



ООО «БИОТЕХКОМП» – компания из города Тольятти, продвигающая собственные инновационные разработки по сбору цианобактерий с поверхности воды, а также внедряющая технологии по утилизации целого спектра органических отходов. Продуктом являются органические, экологически чистые удобрения, а также разрабатываемые экотехнологии переработки отходов.

Команда изобретателей работает в тесном сотрудничестве с учеными, что позволяет создавать собственное оборудование и технологии для сбора и переработки органики.



Сайт: <https://biotehkomp.ru>

E-mail: bio.eco.prom@yandex.ru

Генеральный директор: Чистов Александр Викторович avchist@mail.ru



Компания ТЕХНОНИКОЛЬ – ведущий международный производитель надежных и эффективных строительных материалов и систем. Одним из продуктовых направлений компании является производство субстратов SPELAND и SPELAND ECO на основе каменной ваты для гидропонного выращивания растений.

Основным сырьем для производства субстратов является экологически чистые, натуральные и безопасные компоненты - горные породы габбро-базальтовой группы.



Фото сайта www.speland.com



Заводы по производству субстратов расположены в Рязани и Заинске. Заводы оснащены современным европейским оборудованием. На базе заводов организованы отделы контроля качества с собственными аттестованными лабораториями. Экологичность и безопасность субстратов SPELAND и SPELAND ECO подтверждена санитарно-эпидемиологической экспертизой.

Сайт: www.speland.com



ООО «Хэбараги» - компания, производящая регуляторы роста растений, удобрения и пестициды на основе активированного коллоидного серебра.

Технология защищена патентами более, чем в 20 странах мира.

По вопросам сотрудничества просьба обращаться по адресу: mail@haebaragi.ru

Сайт: <https://haebaragi.ru>



ООО «БИОТА» разрабатывает и развивает масштабное производство новых биологических средств защиты растений:

- действующее вещество которых защищено от основного антагониста – ультрафиолета, что обеспечивает повышение эффективности и пролонгированное действие до 30 раз – до месяца вместо 1 дня.

Первый биопестицид пролонгированного действия в препаративной форме микроконтейнеры «Биостоп Супер» зарегистрирован Минсельхозом России в апреле 2023 г.

- комплексную систему защиты и подкормки растений с использованием биопрепаратов (Система «Круговорот»), позволяющую за счет последовательных стандартных обработок смесью препаратов по прошествии 3-4-х лет достигнуть перехода на нулевую технологию (земледелие без механической обработки земли), снизить расход минеральных удобрений в 3-5 раз, значительно снизить финансовые затраты на средства защиты растений, добиться увеличения запасов гумуса в почве,

практически полностью исключить риски поражения растений болезнями и вредителями за счет формирования беспатогенного ландшафта.

В 2021 г. биоинсектицид "БИОСТОП", производимый ООО «БИОТА», первым из российских средств защиты растений внесен ECOCERT (www.inputs.bio) в международный реестр средств для органического сельского хозяйства.

Сайт: <https://biopesticidy.ru/>



ООО НПИ «Биопрепараты» - уникальный био завод, решающий экологические и ресурсосберегающие проблемы в сельскохозяйственном производстве. На заводе разрабатывается и производится широкий спектр биопрепаратов (60 наименований) для растениеводства, консервирования кормов и животноводства. Экономическая эффективность биопрепаратов в среднем: на зернобобовых культурах – 19-50%; на зерновых – 17-34%, на технических 13-29%; на овощных 18-46%.



Производственная деятельность ООО НПИ «Биопрепараты» основывается на науке в рамках биологизированной системы земледелия, учитывает актуальные проблемы и особую значимость сохранения и приумножения плодородия почв, увеличение разнообразия полезной биоты в почве и снижение ее утомляемости. Компания сотрудничает с учеными Академии наук Татарстана, участвует в научно-практических конференциях, семинарах, в разработке методических рекомендаций в рамках научного обеспечения агропромышленного комплекса.

Среди продукции компании микробиологические удобрения Ризовирт и Татфармат, биофунгицид широкого спектра действия Фитотрикс, зарегистрированные в каталоге разрешенных пестицидов и агрохимикатов для органического растениеводства.

Сайт: <https://biopreparaty.ru/>



Компания «ЦИОН РУС» занимается производством и продажей ионитных питательных субстратов ТМ ЦИОН для выращивания растений на любом грунте по технологии ионитопоники. Субстраты ЦИОН (ZION) разработаны совместно с Институтом физико-органической химии Национальной академии наук Республики Беларусь.



ЦИОН содержит в своем составе все питательные вещества, необходимые для качественного и гармоничного роста растений. Он обладает пролонгированным действием и является 100% экологичной добавкой к грунту благодаря тому, что производится на основе природного минерала вулканического происхождения – цеолита. Благодаря высокому содержанию элементов питания и уникальному принципу действия ионитные субстраты ЦИОН обеспечивают интенсивный рост растений, развитие сильной корневой системы, повышают урожайность зеленных, овощных и плодово-ягодных культур, сокращают сроки созревания урожая. ЦИОН может использоваться как самостоятельно, так и в виде малых корректирующих добавок к любым основам (обедненные и деградированные грунты, пески, перлит, вермикулит, разбалансированная почва любого состава и др.).

Сайт: <https://www.zion-rus.ru>

ИНГОССТРАХ

Страховое публичное акционерное общество (СПАО) «Ингосстрах» — универсальный страховщик федерального уровня. В 2007 году "Ингосстрах" входил в число страховых компаний-основателей Национального союза агостраховщиков (НСА) и с самого начала принимал активное участие в развитии рынка страхования сельскохозяйственных рисков — в том числе, в разработке федерального закона № 260 о господдержке агострахования, который был впервые принят в России в 2011 году. С 2020 года, реализуя программы по страхованию урожая, животных, сельскохозяйственной техники и имущества АПК., компания смогла увеличить объемы страхования по данному направлению более чем в 3 раза.

Сайт: <https://www.ingos.ru/corporate/agriculture/harvest>

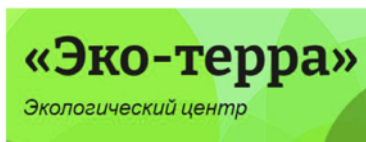
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРТНЕРЫ ФОРУМА



Иннопрактика

В 2012 г. были учреждены Фонд поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых ученых «Национальное интеллектуальное развитие» и Центр национального интеллектуального резерва МГУ. В 2013 г. эти организации стали работать под брендом «Иннопрактика».

Сайт <https://innopraktika.ru>



ООО «Эко-terra» - компания, осуществляющая научные исследования и разработки в области естественных наук, мониторинг загрязнения окружающей среды для физических и юридических лиц.

По вопросам сотрудничества обращаться по адресу: eco-terra_ooo@mail.ru



Ботанический сад МГУ - уникальные экологические системы, вписанные в урбанистический ландшафт мегаполиса, что позволяет использовать их как базу для научных наблюдений, экологического мониторинга, экскурсий, полевой практики студентов, а также разнообразных экологических образовательных проектов. Основой Сада являются коллекции живых растений, ради сохранения, развития и изучения которых Сад и существует: плодовых растений, древовидных пионов, декоративных растений (ирисов, гемерокаллисов, сирени, пионов, роз) и др. Приглашаем посетить Ботанический сад!

Сайт: <https://botsad.msu.ru>

Журнал «Теоретическая и прикладная экология»



Журнал «Теоретическая и прикладная экология» публикует материалы фундаментальных и прикладных научных исследований в области экологически безопасного развития экономики, сохранения недр и устойчивости биосферы, рационального потребления природных ресурсов. Журнал предоставляет непосредственный открытый доступ к своему контенту. Журнал включен в российские и международные базы данных, включая RSCI на платформе Web of Science, Scopus и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). (см. <http://envjournal.ru>)

Журнал «Биосфера»

Редакция журнала "Биосфера" (входит в "Список ВАК" и "Ядро РИНЦ") готова рассмотреть возможность разместить в очередных номерах материалы форума как статьи, оформленные соответственно правилам журнала (см. <http://21bs.ru>) и допущенные к публикации по результатам рецензирования.



АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Mandzhieva S. 156
Rajput P. 156
Soldatov A. 156
Sushkova S. 156
Авдулов Д.А. 12, 144, 215
Алексеев Д.Д. 17
Ахметов Л.А. 128
Баймуратова Р.К. 43
Баранов А.П. 24
Барахов А.В. 34
Батаков А.Д. 30, 190
Бауэр Т.В. 34, 86
Болдырева В.Э. 34
Бондаренко Л.С. 43, 96
Брызгун В.Е. 50, 68, 81, 140
Бурмистрова М.Д. 54
Бутова В.В. 86
Васильева Г.К. 59, 128
Венедюхина Е.П. 50, 68, 81
Вишневский В.Д. 72
Волкова Е.С. 160
Волкова В.Д. 183
Воронина Л.П. 149
Герцен М.М. 76
Голубев Д.М. 50, 68, 81, 140
Грицай М.А. 86
Грузденко Д.А. 91
Джардималиева Г.И. 43
Дзеранов А.А. 43, 96
Евсеева Е.А. 203
Жаркынбаева Р.А. 96
Запорожская А.А. 101
Ильясов Л.О. 108
Калита М.М. 149
Киушов А.А. 226, 234
Ковалева А.О. 209
Ковалева Е.И. 144, 215
Колесников С.И. 222
Коробейникова А.С. 50, 68, 81
Костина Н.В. 12
Кривошеева Е.А. 209
Кулачкова С.А. 122
Куликова Н.А. 117
Кучерова А.В. 222
Кущев П.О. 108
Кыдралиева К.А. 43, 96
Ладан С.С. 24
Мазина С.Е. 209
Максаева Е.С. 122
Маметова А.С. 96
Махов С.А. 54
Минкина Т.М. 34, 86
Минникова Т.В. 174
Михедова Е.Е. 128
Молчанов В.С. 234
Морачевская Е.В. 149
Навольнева Е.В. 135
Нестеркина Д.Д. 50, 68, 81, 140
Панкратов Д.А. 96
Панова И.Г. 91, 108, 226, 234

Перебасова П.М. 144
Переломов Л.В. 76
Пойменов А.С. 135
Поляков В.А. 86
Прудникова Е.В. 149
Разенков И.В. 160
Расчетнова Д.О. 166
Ревина С.Ю. 174
Роберт А.Э. 236
Рудь П.А. 86
Русева А.С. 174
Сазыкин И.С. 177
Саман Д. 96
Сергеева Ю.Д. 183
Славиогло В.Д. 149
Стрижакова Е.Р. 128
Стройкова М.Н. 186
Терехова В.А. 96, 149, 190
Тимофеева Е.А. 54, 197, 203
Тосхопоран А.К. 190
Умарова А.Б. 190
Урусова Е.А. 197, 203
Федоров А.С. 209
Филиппова О.Е. 108
Филонов А.Е. 128
Фортуна А.А. 215
Храпай Е.С. 222
Хронюк О.Е. 34
Чернов В.Е. 226
Шибаетов А.В. 108
Шулаков А.О. 149
Якименко О. С. 91, 226, 234
Ярославов А.А. 108, 238

Научное издание

Материалы молодежной научной школы
Ремедиация почв: инновационные подходы
к восстановлению экологических функций

*28-31 августа 2023, Москва,
МГУ имени М.В.Ломоносова*

Оригинал-макет:

к.б.н. Морачевская Е.В., к.б.н. Зимин Д.А.

Дизайн обложки:

Козлов И.А.

ISBN 978-5-6049991-8-9

ISBN 978-5-6049991-8-9



Подписано в печать 28.08.2023.
Бумага офсетная. Формат 60x84/16.
Гарнитура Times New Roman.
Тираж 100 экз. Заказ № 5035/34.
Постер-М
119296, Москва, ул. Молодежная, 3



ПОЧВЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ В.В. ДОКУЧАЕВА



ИПЭЭ
РАН



ИННОПРАКТИКА



иннагро



ЛИГНОГУМАТ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

АГРОБИ
ТЕХНОЛ  **ГИИ**

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

