

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 2 / 2024, Vol. 16, Iss. 2 <https://esj.today/issue-2-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/07NZVN224.pdf>

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Александров, Д. В. Эффективность применения биоугля и микоризы в восстановлении нефтезагрязненных почв / Д. В. Александров, Э. В. Нафикова, А. Ф. Шаниязова // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/07NZVN224.pdf>

For citation:

Alexandrov D.V., Nafikova E.V., Shaniyazova A.F. The effectiveness of using biochar and mycorrhiza in the restoration of oil-contaminated soils. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(2): 07NZVN224. Available at: <https://esj.today/PDF/07NZVN224.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 504.054

Александров Дмитрий Валерьевич

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия

Ассистент, аспирант

E-mail: dmutruu102@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=986975

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57673170000>

Google Академия: <https://scholar.google.com/citations?user=1Lm80iAAAAAJ>

Нафикова Эльвира Валериковна

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия

Доцент

Кандидат географических наук, доцент

E-mail: vira2006@yandex.ru

Шаниязова Алсу Фардатовна

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия

E-mail: ashaniyazova@bk.ru

Эффективность применения биоугля и микоризы в восстановлении нефтезагрязненных почв

Аннотация. Проблема нарушения почвенного покрова в современном мире становится все более острой в контексте изменений климата и устойчивого использования земельных ресурсов. Это вызывает не только научное, но и общественное внимание к необходимости комплексных и эффективных решений для охраны почвы. Разливы нефтепродуктов, как на суше, так и в море, представляют серьезные угрозы для почвенного покрова и экосистем в целом. Их негативное воздействие проявляется в снижении биоразнообразия, деградации плодородия почвы и угрозе для водных экосистем. Транспортировка нефти через трубопроводы сопровождается риском аварийных разливов, что увеличивает загрязнение земель. Однако, осознание масштабов проблемы и поиск эффективных методов восстановления почвы после нефтезагрязнений являются ключевыми шагами в обеспечении экологической устойчивости. В данном исследовании авторами рассматривается применение метода анализа фрактальной размерности в оценке эффективности восстановления нефтезагрязненных почв с использованием сорбента на основе биоугля и микоризы. Методы экспериментального анализа фитотоксичности почвы и измерения фрактальной размерности зеленой биомассы растений были применены для сопоставления различных сценариев восстановления почвы. Результаты исследования показывают, что добавление сорбента способствует значительному увеличению

всхожести растений, а также стимулирует рост и увеличивает биомассу растений в условиях нефтезагрязненных почв. Кроме того, новый метод анализа фрактальной размерности демонстрирует свою эффективность и точность в оценке изменений зеленой биомассы, что подчеркивает его потенциал в экспресс оценке состояния почвенного покрова и эффективности реабилитации загрязненных экосистем. Полученные авторами результаты обеспечивают ценные данные для разработки и оптимизации методов восстановления почв и улучшения экологического состояния природных экосистем.

Ключевые слова: фрактальная размерность; биоуголь; микориза; нефтезагрязненные почвы; восстановление почвенного покрова; фитотоксичность

Введение

В современном мире проблема нарушения почвенного покрова является одной из наиболее острых и значимых экологических проблем, которая в значительной степени определяется не только устойчивым использованием земельных ресурсов, но и глобальными изменениями климата. Почвенный покров, в свою очередь, представляет собой неотъемлемую часть биосферы, выполняя ряд ключевых функций, в том числе, влияющих на экосистему в целом и здоровье человека в частности. В условиях нарастающей антропогенной нагрузки на биосферу, проблема охраны почвы становится предметом научного и общественного внимания, требуя комплексных и эффективных решений.

Особое внимание уделяется последствиям разлива нефтепродуктов, вызванного интенсивным использованием нефтегазового комплекса как на мировом, так и на региональном уровнях. Этот фактор оказывает серьезное негативное воздействие на почвенный покров, проявляясь в снижении биоразнообразия, деградации плодородия и угрозе для водных экосистем. Следовательно, проблема восстановления почв после нефтезагрязнений становится одним из приоритетных направлений современной экологической науки.

Разливы нефти могут происходить как на суше, так и в море, а также на объектах переработки и хранения нефти. На суше такие разливы могут быть вызваны порывами в трубопроводах, авариями на объектах добычи и транспортировки, а также из-за несчастных случаев на перерабатывающих заводах и хранилищах.

Транспортировка нефти через промышленные и магистральные трубопроводы является наиболее экономически выгодным методом. Тем не менее, этот процесс сопровождается многочисленными аварийными разливами нефтепродуктов из-за порывов, связанных с износом оборудования, ошибками персонала или повреждениями при проведении работ. По данным Федеральной службы государственной статистики статистического бюллетеня «Основные показатели охраны окружающей среды» за 2023 год, в 2022 году площадь нарушенных земель в Российской Федерации вследствие утечки при транзите газа, нефти и продуктов ее переработки составляет 128 тысяч гектаров [1]. Примерно такая же площадь загрязнения была в 2021 году (рис. 1). Нефтепродукты представляют собой смесь простых и сложных углеводородов, в основном состоящих из углерода и водорода, а также содержащих некоторое количество азота, серы и кислорода [2; 3]. Их токсичность, мутагенный и канцерогенный характер, а также устойчивость в окружающей среде могут оказать влияние на компоненты экосистемы, свойства почв, их плодородие, здоровье человека, поэтому они рассматриваются как приоритетные и загрязняющие вещества.

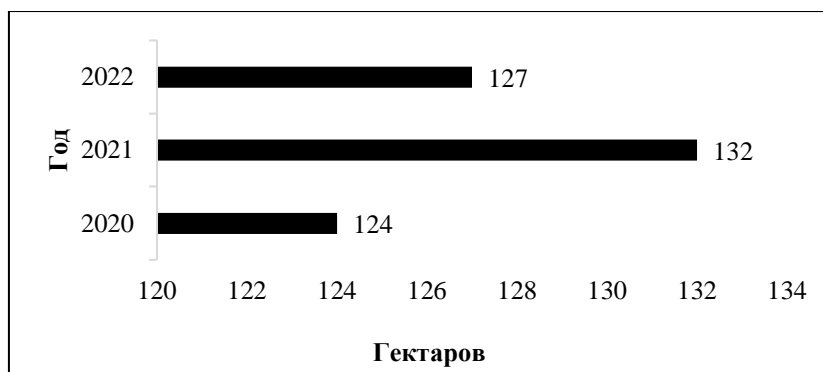


Рисунок 1. Площадь нарушенных и обработанных земель на территории Российской Федерации за 2020–2022 гг. (разработано автором)

Для восстановления почвенного покрова, загрязненного нефтью, применяются различные методы. Один из набирающих популярность подходов — биоремедиация, относящаяся к биологическому методу и основанная на воздействии микроорганизмов. Кроме того, исследуются физические и химические методы. Каждый из этих подходов обладает своими преимуществами и недостатками, и выбор определенного метода зависит от различных факторов, таких как состав почвы, степень загрязнения и целевые задачи рекультивации [4].

Цель настоящего исследования заключается в разработке и применении передовых методов рекультивации почв, подвергшихся воздействию нефтепродуктов. В рамках нашего исследования мы предлагаем применение гибридного метода восстановления нарушенного почвенного покрова, который объединяет в себе физические методы и метод биоремедиации. Этот подход основан на использовании сорбента на основе биоугля и микоризы, что позволяет эффективно восстанавливать земельные ресурсы. В ходе данного исследования была осуществлена интеграция метода фрактального анализа с оценкой фитотоксичности почв с целью комплексной оценки состояния окружающей среды. Такой комплексный подход не только способствует восстановлению почвенного покрова, но и играет важную роль в обеспечении устойчивого использования природных ресурсов и сохранении биоразнообразия, что представляет собой фундаментальные задачи современной науки.

Объекты и методы

Объекты

Свойства почвы. Эксперимент проводили с использованием чернозёма солонцеватой сельскохозяйственной почвы села Булгаково Республики Башкортостан. Почвы была отобрана из 30-сантиметрованного слоя незагрязненной территории. Почву сначала сушили в течение 7 дней в сухом помещении при температуре 24°C, нормальном атмосферном давлении и с 40 % влажностью помещения. Высушенную почву сначала просеивали через сито с размером ячеек сетки 1 см для того, чтобы исключить из нее объемные фракции, после через сито с размером ячеек сетки 3 мм. Полученную почву поместили в герметичный контейнер для дальнейшей подготовки к экспериментальной части.

Добавки. При эксперименте использовали легкую, малопарафинистую и малосернистую нефть.

Сорбент. В качестве сорбента использовали растительный сорбент из биоугля и микоризы, который описывали в патенте № 2801148 Российской Федерации, разработанном Нафиковой Э.В., Александровым Д.В., Шаниязовой А.Ф. и Сидоровой А.Н.

Биоуголь представляет собой устойчивый, углеродный продукт, получаемый в результате термической обработки биомассы в условиях ограниченного доступа кислорода [5]. Биоуголь может быть произведен различными методами, включая, но не ограничиваясь, процессами, такими как пиролиз, торрефикация, газификация, гидротермальная карбонизация и вспышечная карбонизация. Пиролиз выделяется как метод, обладающий высокой эффективностью, простотой и широким использованием. Этот процесс, основанный на термическом разложении биомассы в отсутствие кислорода, является не только эффективным, но и относительно простым в реализации. Благодаря этим характеристикам, пиролиз становится предпочтительным методом для получения биоугля, обеспечивая оптимальное сочетание высокой эффективности процесса и его технической доступности [6]. Биоуголь используется в широком спектре областей и задач благодаря своим уникальным характеристикам. Биоуголь рассматривается как активная добавка для множества биологических процессов, таких как улучшение биологических свойств почвы [7], увеличение урожайности [8; 9]. В последние годы биоуголь стал широко применяться в практике ремедиации, благодаря своим выдающимся сорбционным характеристикам.

Микоризные симбиозы представляют собой взаимовыгодные отношения между растениями и микоризными грибами. В таком взаимовыгодном взаимодействии грибы получают углерод, полученный путем фотосинтеза растений, в то время как они предоставляют своему растению — хозяину воду и минеральные питательные вещества, особенно фосфор (P) и азот (N). Этот обмен питательными веществами влияет на ключевые почвенные процессы и циклы питательных веществ, а также на здоровье растений, и, следовательно, оказывает сильное воздействие на функционирование растительной экосистемы [10]. Во время симбиоза корни растений и гифы микоризных грибов привлекают в свою микоризосферу различные микроорганизмы. Микоризные грибы могут посредничать во взаимодействии растений с микробиомом микоризосферы, что также способствует стимулированию роста растений, усвоению питательных веществ и устойчивости к биотическим или абиотическим стрессам [11; 12].

В основе данного исследования лежит использование биоугля в сочетании с микоризой в роли инновационного растительного сорбента для нефтепродуктов. Составляющие сорбента, биоуголь и микориза, их физико-химические свойства, а также взаимодействие с нефтепродуктами в почвенном покрове, представляют собой малоизученную область. В контексте данного исследования демонстрируется эффективность этого сочетания для ускоренного и более эффективного восстановления нефтезагрязненных земель.

Условия проведения экспериментов

Заложен модельный лабораторный эксперимент, в рамках которого была проведена имитация нефтяного разлива на почве. Этот эксперимент представляет собой модельное воссоздание ситуации разлива нефтепродуктов для анализа и изучения последствий такого воздействия на окружающую среду и почвенный покров. Просеянную почву весом в 400 грамм отбирали в 40 прозрачных пластиковых контейнерах. Контейнеры предварительно обворачивали фольгой для изоляции от ультрафиолетовых лучей. Контейнеры разделили условно по группам, согласно условиям приведенным в таблице 1.

Подготовлено 8 различных групп с разными концентрациями нефти, с добавлением сорбента и без него, а также контроль. Концентрации нефти использовались 2, 5 или 10 масс. %. Сорбент добавляли 10 масс. % в соответствии с рекомендациями добавления биоугля, т. к. биоуголь составляет существенную часть от всего объема сорбента [13].

Таблица 1

Условные обозначения в рамках экспериментальной части

№ п/п	Условное обозначение	Пояснение
1	К	контейнеры без добавления нефти и сорбента (5 шт.)
2	КС	контейнеры с добавлением сорбента (5 шт.)
3	Н2	контейнеры с добавлением нефти, концентрацией 2 масс. % но без сорбента (5 шт.)
4	Н5	контейнеры с добавлением нефти, концентрацией 5 масс. % но без сорбента (5 шт.)
5	Н10	контейнеры с добавлением нефти, концентрацией 10 масс. % но без сорбента (5 шт.)
6	НС2	контейнеры с добавлением нефти, концентрацией 2 масс. % и с используемым сорбентом 10 масс. % (5 шт.)
7	НС5	контейнеры с добавлением нефти, концентрацией 5 масс. % и с используемым сорбентом 10 масс. % (5 шт.)
8	НС10	контейнеры с добавлением нефти, концентрацией 10 масс. % и с используемым сорбентом 10 масс. % (5 шт.)

Разработано автором

Нефть дозировали с использованием пипетки в соответствии с заданными концентрациями. После добавления нефти почва тщательно перемешивалась и оставалась на двое суток для имитации нефтяного разлива. После испарения легких фракций проводили рекультивационные мероприятия в лабораторных условиях.

Согласно заранее определенным группам добавляли сорбент из биоугля и микоризы и тщательно перемешивали почву. Далее в каждый контейнер высаживали по 5 семян овса (*Avena Sativa*), т. к. он является хорошим биоиндикатором на присутствие нефтепродуктов в почве [14].

Полученные экспериментальный образцы поместили в светлое помещение с температурой воздуха 24°C, относительной влажностью воздуха 50 % при нормальном атмосферном давлении. Ежедневно в течение двух недель образцы поливали 200 мл воды из пульверизатора, чтобы избежать деформирования почвы под воздействием воды. Ежедневно производился замер прорастания семян, а также кислотность и температура почвы.

Через 21 сутки после эксперимента, мы провели анализ результатов, измерили длину корней и стеблей растений, а также определили их биомассу. Кроме того, мы использовали высококачественный сканер для создания сканов каждого растения овса с целью дальнейшего определения фрактальной размерности зеленой биомассы листьев.

Методы анализов

Фитотоксичность почвы. По прошествии 21 суток мы провели оценку всхожести овса (*Avena Sativa*) с использованием экспресс-метода, измерили длину корня, длину стебля и количества биомассы растений. Все растения были взвешены, и измерены длины их корней и стеблей, а также зафиксирована всхожесть. Каждое измерение было проведено 5 раз с каждым образцом растений из каждого контейнера.

Фрактальный анализ. Методы определения фрактальной размерности при применении фрактальной геометрии используются во многих сферах для сравнения объектов и их описания. Предложено определить фрактальную размерность зеленой биомассы растений с помощью специального программного обеспечения.

Для этого получили высококачественные сканы полученных растений на белом фоне, обработали их с помощью фоторедактора и получили изображения в формате PNG (1024 × 1024 пикселей).

Данные изображения были обработаны с помощью программной среды MATLAB с заранее прописанным кодом для подсчета фрактальной размерности методом «box counting» [14].

Полученные значения фиксировали в таблице excel и считали среднее значение по каждой группе.

Результаты и обсуждения

Влияние сорбента на pH почвы. Перед экспериментальной частью в каждом контейнере фиксировалось значение pH. В каждом случае значение pH было нейтральным, или близко к нейтральному. При добавлении сорбента, в котором биоуголь играет функцию нейтрализатора кислых почв значение pH не изменилось.

Влияние сорбента на фитотоксичность нефтезагрязненной почвы. По показаниям всхожести видно, что овес (*Avena Sativa*) при 10 % концентрации нефти практически полностью погибал (рис. 2). Но при внесении сорбента наблюдается значительное увеличение растений, которые взошли в контейнерах. Без присутствия нефтепродуктов в почве, напротив, сорбент не играет особой роли, т. к. всхожесть варьируется в пределах погрешности.

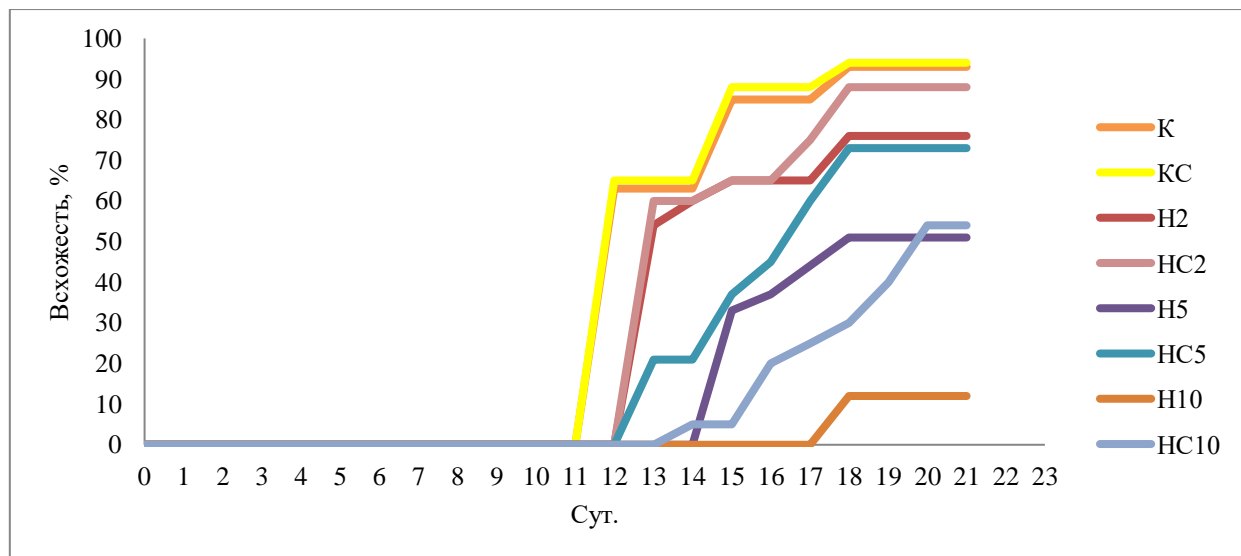


Рисунок 2. Всхожесть овса *Avena Sativa* согласно концентрациям, используемым в эксперименте (разработано автором)

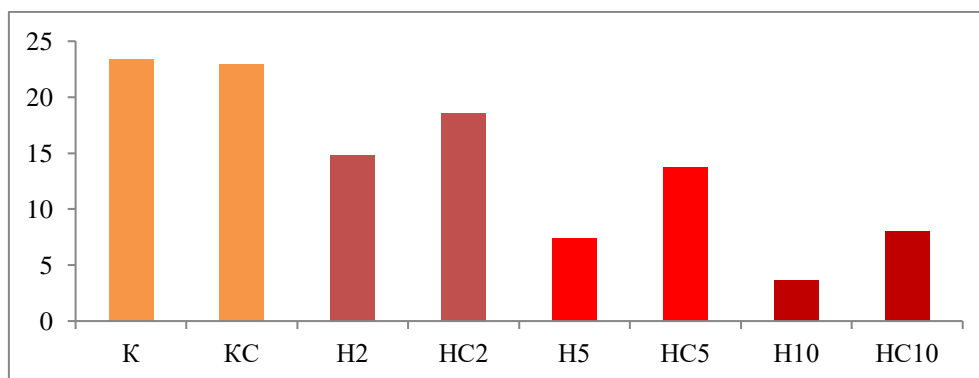


Рисунок 3. Длина стебля овса *Avena Sativa* согласно концентрациям, используемым в эксперименте (разработано автором)

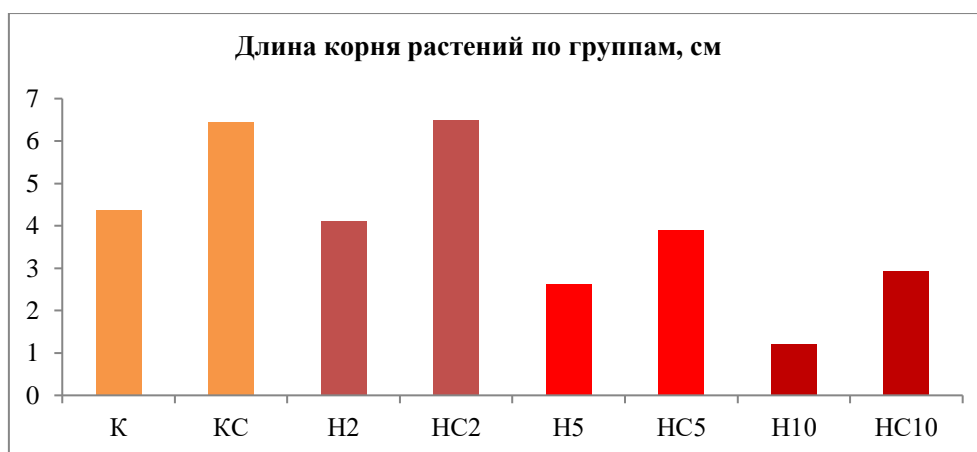


Рисунок 4. Длина корня овса *Avena Sativa* согласно концентрациям, используемым в эксперименте (разработано автором)

По полученным показаниям длины стебля наблюдается похожая тенденция (рис. 3). Использование сорбента для восстановления нарушенного почвенного покрова стимулирует рост растений, вследствие этого растет общая биомасса растений. Аналогичный результат наблюдали и при длине корня растений (рис. 4), но здесь показатели увеличивались практически в два раза, т. к. в сорбенте присутствует микориза, которая стимулирует и укрепляет корневую систему.

При измерении биомассы растений на весах проявилась похожая тенденция аналогичная всхожести растений. С увеличением концентрации нефти, биомасса уменьшалась, но добавление сорбента способствовало ее увеличению.

Изменение фрактальной размерности. Усредненные результаты измерения фрактальной размерности овса *Avena Sativa* согласно концентрациям, используемым в эксперименте приведены в таблице 2.

Таблица 2

Средние значения фрактальной размерности овса *Avena Sativa* согласно концентрациям, используемым в эксперименте

К	КС	Н2	НС2	Н5	НС5	Н10	НС10
1,31	1,33	1,26	1,29	1,26	1,27	1,2	1,24

Разработано автором

Из полученных значений фрактальной размерности зеленой биомассы листьев овса *Avena Sativa* можно сделать вывод, что присутствие сорбента в почве способствует стимулированию роста растений.

Выводы

В представленном исследовании эффективность применения биоугля в сочетании с микоризой для восстановления почв, подвергшихся загрязнению нефтепродуктами, была подвергнута анализу. Полученные результаты говорят об перспективных возможностях сорбционных материалов на основе биоугля в контексте рекультивации загрязненных почв.

Экспериментальные наблюдения позволили установить, что применение предложенного сорбента оказывает сильное снижение фитотоксичности почвенной среды, особенно при повышенных концентрациях нефтепродуктов. Одновременно необходимо

отметить сохранение нейтрального уровня pH почвы, что свидетельствует о высокой степени стабильности среды в присутствии сорбента.

Анализ фрактальной размерности зеленой биомассы растений подтвердил увеличение общей биомассы при применении предложенного сорбента. Полученные данные свидетельствуют о потенциале сорбционных материалов на основе биоугля и микоризы в контексте стимулирования роста растений и восстановления почвенного покрова.

В целом, проведенное исследование демонстрирует не только высокую эффективность применяемого метода, но и подчеркивает его перспективность в области экологической и сельскохозяйственной практики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Использование биотестирования для оценки сорбционной биоремедиации нефтезагрязненной подзолистой почвы Западной Сибири / Михедова Е.Е. и др. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2024. — Т. 28. — №. 4. — С. 595–605. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-4-595-605>.
2. Application of bioremediation technology in the environment contaminated with petroleum hydrocarbon / Chandra, S., Sharma, R., Singh, K., & Sharma, A. // Annals of microbiology. — 2013. — Vol. 63(2). — pp. 417–431. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13213-012-0543-3>.
3. A new look on factors affecting microbial degradation of petroleum hydrocarbon pollutants / Varjani, S.J., & Upasani, V.N. // International Biodeterioration & Biodegradation. — 2017. — Vol. 120. — pp. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.006>.
4. Обзор неорганических сорбентов для ликвидации разливов нефти / Карапетян, К.Г., Дорош, И.В., & Коршунов, А.Д. // Южно-Сибирский научный вестник. — 2023. — № 4(50). — С. 77–88. DOI: <http://dx.doi.org/10.25699/SSSB.2023.50.4.012>.
5. Significance of biochar application to the environment and economy / Oni, B.A., Oziegbe, O., & Olawole, O.O. // Annals of Agricultural Sciences. — 2019. — Vol. 64(2). — pp. 222–236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2019.12.006>.
6. Biochar: a sustainable solution / Kumar, A., & Bhattacharya, T. // Environment, Development and Sustainability. — 2021. — Vol. 23. — pp. 6642–6680. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00970-0>.
7. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review / Al-Wabel, M.I., Hussain, Q., Usman, A.R., Ahmad, M., Abduljabbar, A., Sallam, A.S., & Ok, Y.S. // Land Degradation & Development. — 2018. — Vol. 29(7). — pp. 2124–2161. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2829>.
8. Applying microwave vacuum pyrolysis to design moisture retention and pH neutralizing palm kernel shell biochar for mushroom production / Mahari, W.A.W., Nam, W.L., Sonne, C., Peng, W., Phang, X.Y., Liew, R.K., & Lam, S.S. // Bioresource technology. — 2020. — Vol. 312. — P. 123572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123572>.

9. Durable superhydrophobic/superoleophilic graphene-based foam for high-efficiency oil spill cleanups and recovery / Chen, C., Zhu, X., & Chen, B. // *Environmental science & technology*. — 2019. — Vol. 53(3). — pp. 1509–1517. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04642>.
10. Применение сорбентов и микоризных грибов для очистки нефтезагрязненных земель / Карапетян, К.Г., Дорош, И.В., Собянина, Д.О., & Нафикова, Э.В. // *Южно-Сибирский научный вестник*. — 2022. — № 4(44). — С. 116–122. DOI: <http://dx.doi.org/10.25699/SSSB.2022.44.4.016>.
11. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere / Philippot, L., Raaijmakers, J.M., Lemanceau, P., & Van Der Putten, W.H. // *Nature reviews microbiology*. — 2013. — Vol. 11(11). — pp. 789–799. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>.
12. Arbuscular mycorrhizal fungi conducting the hyphosphere bacterial orchestra / Zhang, L., Zhou, J., George, T. S., Limpens, E., & Feng, G. // *Trends in plant science*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.10.008>.
13. Biochar improves the performance of *Avena sativa* L. grown in gasoline-polluted soils / Fedeli, R., Alexandrov, D., Celletti, S., Nafikova, E., & Loppi, S. // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2023. — Vol. 30(11). — pp. 28791–28802. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24127-w>
14. Estimation of Rice Biomass at Different Growth Stages by Using Fractal Dimension in Image Processing / Hu, Y., Shen, J., & Qi, Y. // *Appl. Sci*. — 2021. — Vol. 11. — P. 7151. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11157151>.

Alexandrov Dmitriy Valeryevich

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: dmutruu102@yandex.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=986975

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57673170000>

Google Академия: <https://scholar.google.com/citations?user=1Lm80iAAAAAJ>

Nafikova Elvira Valerikovna

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: vira2006@yandex.ru

Shaniyazova Alsu Fardatovna

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: ashaniyazova@bk.ru

The effectiveness of using biochar and mycorrhiza in the restoration of oil-contaminated soils

Abstract. The problem of soil cover disturbance in the modern world is becoming increasingly acute in the context of climate change and sustainable land use. This has drawn scientific and public attention to the need for comprehensive and effective solutions to soil conservation. Oil spills, both on land and at sea, pose serious threats to soil cover and ecosystems as a whole. Their negative impact manifests in the reduction of biodiversity, soil fertility degradation, and threats to aquatic ecosystems. Oil transportation through pipelines carries the risk of accidental spills, exacerbating land pollution. However, the recognition of the problem's scale and the search for effective soil restoration methods after oil pollution are key steps in ensuring environmental sustainability. This study explores the application of fractal dimension analysis in assessing the effectiveness of restoring oil-contaminated soils using a sorbent based on biochar and mycorrhiza. Experimental methods for soil phytotoxicity analysis and measuring the fractal dimension of plant green biomass were employed to compare different soil restoration scenarios. The results show that the addition of the sorbent significantly increases plant germination, stimulates growth, and enhances plant biomass in oil-contaminated soil conditions. Furthermore, the new fractal dimension analysis method demonstrates its effectiveness and accuracy in evaluating changes in green biomass, highlighting its potential in the rapid assessment of soil cover conditions and the effectiveness of rehabilitating polluted ecosystems. The findings provide valuable insights for the development and optimization of soil restoration methods and improving the ecological state of natural ecosystems.

Keywords: fractal dimensionality; biochar; mycorrhiza; oil-contaminated soils; soil cover restoration; phytotoxicity