

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

2024, Том 16, № 6 / 2024, Vol. 16, Iss. 6 <https://esj.today/issue-6-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/56NZVN624.pdf>

DOI: 10.15862/56NZVN624 (<https://doi.org/10.15862/56NZVN624>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Шайхулисламов, Я. Р. Использование фрактального анализа для определения эффективности рекультивации почв после нефтезагрязнений при оценке биомассы растения-биоиндикатора *avena sativa* / Я. Р. Шайхулисламов, Э. В. Нафикова, Д. В. Александров, А. Н. Сидорова, Я. Д. Левченко // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/56NZVN624.pdf> DOI: 10.15862/56NZVN624

For citation:

Shaihulislamov Ya.R., Nafikova E.V., Alexandrov D.V., Sidorova A.N., Levchenko Ya.M. The use of fractal analysis to determine the effectiveness of soil reclamation after crude oil pollution in assessing the biomass of the *avena sativa* bioindicator plant. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(6): 56NZVN624. Available at: <https://esj.today/PDF/56NZVN624.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/56NZVN624

УДК 504.054

Шайхулисламов Ян Рамилевич

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

Инженер

E-mail: yanmarley99@gmail.com; yana.levchenko.2014@bk.ru

ИНИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1225601

Нафикова Эльвира Валериковна

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

Доцент

Кандидат географических наук

E-mail: vira2006@yandex.ru

Александров Дмитрий Валерьевич

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

Ассистент

E-mail: dmutruurus@gmail.com

Сидорова Арина Николаевна

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

E-mail: Arinasidorova303@gmail.com

Левченко Яна Дмитриевна

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

E-mail: yana.levchenko.2014@bk.ru

**Использование фрактального анализа для
определения эффективности рекультивации почв
после нефтезагрязнений при оценке биомассы
растения-биоиндикатора *avena sativa***

Аннотация. В условиях активного освоения техногенно-природных ландшафтов разрушение почвенного покрова становится все более острой экологической проблемой. Особое внимание стоит уделить вопросу о негативных последствиях разливов нефти и

нефтепродуктов, которые наносят серьезный ущерб почвам и экосистеме, снижая биоразнообразие, плодородие почвы и нанося вред водным ресурсам. Аварии при транспортировке нефти и нефтепродуктов усугубляют ситуацию, делая восстановление почв важной задачей для обеспечения экологической устойчивости. Эффективное восстановление почв после нефтезагрязнений остается сложной проблемой, требующей инновационных подходов. Существующие методы реабилитации почв зачастую малоэффективны, особенно когда речь идёт о больших площадях и сложных климатических условиях. Разработка комплексных методов оценки состояния почвы и мониторинга процесса ее восстановления необходима для обеспечения экологической устойчивости. Авторы исследования предлагают использовать метод анализа фрактальной размерности для оценки эффективности восстановления нефтезагрязненных почв. В рамках этого подхода применяется сорбент на основе биоугля и микоризы, что помогает повысить всхожесть растений и стимулировать их рост на загрязненной почве. Экспериментальные методы анализа фитотоксичности почвы и измерения фрактальной размерности зелёной биомассы растений позволили оценить различные сценарии восстановления почвы. Исследование показало, что добавление сорбента на основе биоугля существенно улучшает всхожесть растений и способствует росту их биомассы даже в условиях нефтезагрязнения. Новый метод анализа фрактальной размерности подтвердил свою эффективность и точность в оценке изменений зелёной биомассы, что делает его перспективным инструментом для быстрой оценки состояния почвенного покрова и эффективности реабилитационных мероприятий. Полученные результаты предоставляют ценную информацию для совершенствования методов восстановления почв и улучшения экологического состояния природных экосистем. Использование сорбентов на основе биоугля и методов анализа фрактальной размерности открывает новые возможности для разработки эффективных стратегий реабилитации загрязненных территорий и повышения устойчивости экосистем к внешним воздействиям.

Ключевые слова: биоиндикация; овёс обыкновенный (*Avéna satíva*); геоэкологическая оценка; фрактальный анализ; оценка окружающей среды; биоуголь; микориза

Введение

Современный мир является периодом высокого уровня развития сферы добычи полезных ископаемых и промышленности, в частности направления нефтедобычи и нефтепереработки, вместе с этим растут и экономические потери, связанные с разного рода нефтяными и земельными ресурсами. Процесс рекультивации является необходимым инструментом в восстановлении изначальных свойств почв.

В зависимости от условий, в которых произошло загрязнение, зависит и сложность проведения рекультивации, что часто тоже является серьёзной экономической проблемой в связи с высоким уровнем цен реализуемых проектов по рекультивации. Биоуголь выступая в качестве сорбента в процессе рекультивации, значительно ускоряет и упрощает процесс, являясь высокоэффективным, легко производимым и не требовательным к внешним условиям материалом. Микориза в свою очередь, в сочетании с биоуглём, оказывает усиливающий эффект в процессе рекультивации за счёт расширения корневой системы и увеличения её поглотительной способности у фиторемидиантов.

Неотъемлемой частью процесса рекультивации является оценка её эффективности, большинство методов в данной сфере являются довольно долго реализуемыми и не дают комплексного представления о эффективности проведения рекультивации, имея при этом достаточно высокую стоимость. В подобных реалиях необходима оперативная оценка эффективности рекультивации с наиболее выгодным ценником, без потерь в качестве.

Наиболее простым методом является оценка, но для подробных результатов необходимо проведение исследования путём использования метода определения фитотоксичности, что может занимать достаточное количество времени и не может дать полный объём информации в связи с использованием узкого количества параметров в своей методике (длина ростка, длина корня, всхожесть, масса образца, pH — параметр, температура почв).

Фрактальная геометрия, не опираясь на Евклидову математику, позволяет проводить анализ сложных геометрических структур геоэкологических объектов, что не позволили бы сделать методы опирающиеся на Евклидову геометрию. Фрактальная размерность при подсчёте биомасс образцов биоиндикаторов даёт более точное представление о качестве образца и эффективности рекультивации, но всё ещё коррелирует с результатами проведения анализа методом фитотоксичности. Значение фрактальной размерности увеличивается пропорционально эффективности процесса рекультивации.

Целью работы является исследование эффективности проведения рекультивации с применением биоугля и микоризы на примере овса обыкновенного (*Avena sativa*) с помощью фрактального анализа биомассы.

Для достижения цели ставятся следующие задачи:

- проведение двух экспериментов по рекультивации нефтезагрязнённых почв с помощью биоугля в качестве сорбента, микоризы для усиления корневой системы и поглощающей способности растений, овса обыкновенного в качестве биоиндикатора;
- проведение анализа эффективности рекультивации методом определения фитотоксичности и фрактального анализа биомасс исследуемых образцов;
- сопоставление результатов.

В качестве объекта исследования выступает овёс обыкновенный (*Avena sativa*.), в качестве предмета — эффективность рекультивации почв, загрязнённых нефтепродуктами биоуглём и микоризой.

1 Материалы и методы исследования

1.1 Биоуголь

Биочар (биоуголь) — уголь не только древесного, но и растительного происхождения. Являясь твёрдым углеродосодержащим побочным продуктом пиролиза, может использоваться в улучшении почв и в качестве сорбента. Главным достоинством биоугля стала его способность связывать углерод попутно увеличивая пористость, катионный обмен, влагоудержание и аэрацию почв, в которых применяется. Биочар снижает доступность токсичных элементов растениям и другим организмам путём обездвиживания (обезвреживания) органических и неорганических веществ. Для производства данного типа угля могут использоваться отходы лесопромышленного комплекса и сельского хозяйства: кора, измельчённая древесина, паллеты, поддоны, щепы, фрезерная и окорочная стружка, круглые лесоматериалы, опилки, спелая древесина, ореховая скорлупа, тростник, кукурузные кочерыжки. Скорость декомпозиции биоугля описывается как одна из самых медленных известных для природных органических соединений [1].

Биочар содержит в себе от 93 до 99 % углерода при этом отличается отсутствием токсичных примесей. Сочетая в себе всё перечисленное биочар является отличным удобрением за счёт увеличения плодородности почв, в которые он был внесён, эффективным сорбентом, а также секвестром углерода. Доказано, что биоуголь также уменьшает общую декомпозицию

soil organic matter (SOM), и предположительно биоуголь может оставаться стабильным в почвах в течение веков и улучшать секвестрацию углерода. Учитывая гораздо более медленное разложение в полевых условиях, среднее время пребывания биоугля в почвах умеренного климата примерно оценивается в 4 000 лет [2].

Добавление биоугля может увеличить запас углерода в почвах, и один из механизмов, который может лежать в основе этого явления, заключается в адсорбции полисахаридов на ароматический углерод. Эффект грунтования, вызванный биоуглём, на минерализацию SOM зависит от различных факторов включая продолжительность эксперимента, характеристик биоугля и свойств почвы. За исключением типа и продолжительности эксперимента, а также вида землепользования и межгрупповой неоднородности [3].

1.2 Микориза

Микориза — это симбиотическая ассоциация между корневой системой растения и грибом. В связи с полифункциональным действием АМ-грибов на растение-хозяина в настоящее время активно развиваются биотехнологии, направленные на использование инокулятов микоризных грибов в сельском хозяйстве в качестве биопрепаратов-усилителей роста растений [4]. Несколько исследований доказали, что микориза улучшает снабжение питательными веществами различных растительных культур [5]. В результате соприкосновения двух культур гриб колонизирует корневые ткани растения-хозяина, образуя таким образом симбиотическую связь. Связи могут отличаться в зависимости от типа грибов:

1. Внутриклеточная связь при арбускулярном типе микоризных грибов.
2. Внеклеточная связь при связи с эктомикоризными грибами.
3. Мутуалистическая связь.

Подобные связи улучшают способности растений поглощать минеральные вещества, т. к. корни растений без посторонней помощи часто неспособны усваивать питательные вещества, которые были химически или физически иммобилизованы. Механизмы, с помощью которых микориза увеличивает поглощение, включают некоторые физические и некоторые химические аппараты. Физически большая часть микоризного мицелия намного меньше в диаметре, чем самый маленький корень или корневые волоски, и, таким образом, может поглощать материал почвы, до которого корни и корневые волоски не могут добраться, и обеспечивает большую площадь поверхности для поглощения. Химический состав клеточных мембран грибов отличается от химического состава клеточных мембран растений.

Например, они могут выделять органические кислоты, которые растворяют или хелатируют многие ионы или высвобождают их из минералов путем ионного обмена. Показано, что образование сетей микоризы способствует усилению минерального (особенно фосфорного) питания растений, защите их от патогенов, адаптации к повышенному уровню тяжелых металлов и иных загрязняющих веществ, а также к ускорению развития растений в целом [4].

Микориза особенно полезна для растений-партнеров на бедных питательными веществами почвах. Грибы играют защитную роль для растений, укореняющихся на почвах с высокой концентрацией металлов, таких как кислые и загрязненные почвы. Растения, посаженные на нескольких загрязненных участках, показали высокую устойчивость к преобладающему загрязнителю, выживаемость и рост. В западных странах фиторемедиация приобрела большую популярность, что отчасти связано с её низкой стоимостью. Так как в процессе фиторемедиации используется только энергия солнца, данная технология на порядок дешевле методов, основанных на применении тяжёлой техники [6].

1.3 Метод определения фитотоксичности

Фитотоксичность — свойство групп химических препаратов и пестицидов действовать на растения отравляюще, приводя к нарушениям их роста и гибели. Стойкие сорта противодействуют фитотоксичности на уровне физических и биохимических процессов, проходящих в их тканях. Фитотоксичными считают почвы, которые ингибируют: прорастание семян или развитие проростков и корней на 20 % и более в сравнении с контролем; стимулирующее действие ($> 30\%$), также часто свидетельствует о наличии токсичных веществ в данной почве [7].

Надземная биомасса обычно коррелирует с большей длиной стеблей, а накопление подземной биомассы — с большим удлинением корневой системы [8].

Таким образом, можно предположить, что суммарная фитотоксичность почв — это комплексный показатель, который отражает не только естественное плодородие, но и влияние на взаимодействие различных факторов, оказывающих на почву как негативное, так и положительное воздействие (внесение органических и минеральных удобрений, загрязнение почв фитотоксичными веществами, изменение почвенной микрофлоры, влияние предшественников и так далее) [7].

Всхожесть — показатель, который характеризуется количеством семян, нормально проросших за определенный период времени при определенных оптимальных условиях проращивания (за исключением изучаемого фактора) по отношению к общему количеству взятых на проращивание семян, и выражается в процентах. Сроки определения всхожести у разных растений сильно отличаются — от 3–5 до 10–15 дней.

Порядок проведения анализа представлен на рисунке 1.

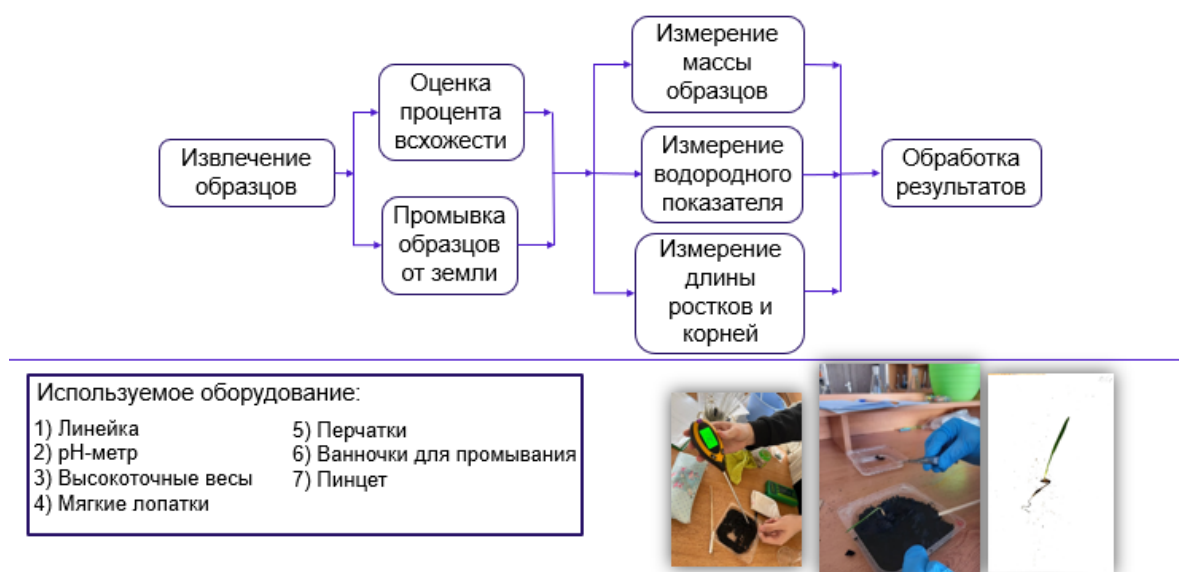


Рисунок 1. Порядок проведения анализа с помощью метода фитотоксичности и оборудование используемое в процессе (составлено автором)

Основными параметрами, изучаемыми в процессе биотестирования на фитотоксичность, являются длина ростка, длина корня, масса образца, всхожесть.

2.3 Фрактальный анализ

Фрактальный анализ — универсальный математический метод для охарактеризованния большинства природных явлений, объектов и процессов [9]. Он состоит из нескольких методов

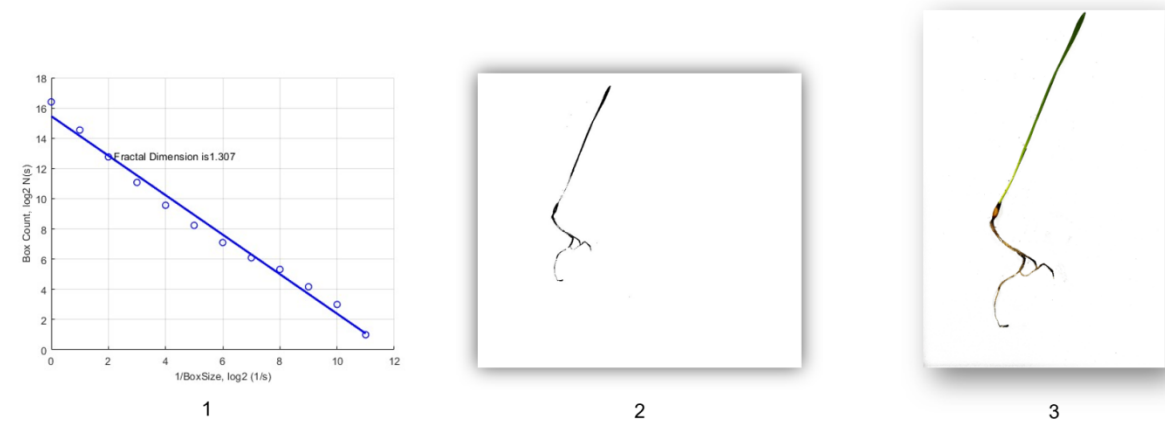
присвоения фрактального измерения и других фрактальных характеристик набора данных, который может быть теоретическим набором данных, шаблоном или сигналом, извлеченным из явлений, включая топографию, естественные геометрические объекты, экологию и гидрологию, звук, колебания рынка, частоту сердечных сокращений, частотную область в сигналах электроэнцефалографии, цифровые изображения, молекулярное движение и наука о данных. Фрактальный анализ в настоящее время широко используется во всех областях науки. Важным ограничением фрактального анализа является то, что получение эмпирически определенного фрактального измерения не обязательно доказывает, что паттерн фрактален; скорее, необходимо учитывать другие существенные характеристики. Фрактальный анализ ценен для расширения наших знаний о структуре и функциях различных систем, а также как потенциальный инструмент для математической оценки новых областей исследования. Было сформулировано фрактальное исчисление, которое является обобщением обычного исчисления [10]. В отличие от теоретических фрактальных кривых, которые можно легко измерить и вычислить лежащие в их основе математические свойства, естественные системы являются источниками неоднородности и генерируют сложные пространственно-временные структуры, которые могут демонстрировать лишь частичное самоподобие. Используя фрактальный анализ, можно анализировать и распознавать, когда изменяются характеристики сложных экологических систем, поскольку фракталы способны характеризовать естественную сложность в таких системах. Таким образом, фрактальный анализ может помочь количественно оценить закономерности в природе и выявить отклонения от этих естественных последовательностей. Он помогает улучшить наше общее понимание экосистем и выявить некоторые лежащие в основе структурные механизмы природы. Использование фрактального анализа для понимания структур, а также пространственной и временной сложности биологических систем уже хорошо изучено, и его использование продолжает расширяться в экологических исследованиях. Несмотря на его широкое использование, он все еще подвергается некоторой критике.

Фрактальная размерность — показатель сложности самоподобной фигуры, мера того, сколько одинаковых объектов присутствует в множестве. Фрактальная размерность представляет меру скорости добавления дополнительных деталей при переходе от одного масштаба к следующему. Это коэффициент, описывающий геометрически сложные формы, для которых детали являются более важными, чем полный рисунок. Если фрактальная размерность множества превышает топологическую размерность, то множество имеет фрактальную геометрию.

Box-counting — это метод сбора данных для анализа сложных шаблонов путем разбиения набора данных, объектов, изображений и т. д. на все более мелкие фрагменты, обычно имеющие форму «коробки», откуда и приобретено название, и анализа фрагментов в каждом меньшем масштабе. Сутью процесса является увеличение или уменьшение масштаба с использованием оптических или компьютерных методов для изучения того, какие наблюдаются изменения в деталях в зависимости от масштаба. Однако при подсчете коробок вместо изменения увеличения или разрешающей способности объектива исследователь изменяет размер элемента, используемого для осмотра объекта или изображения. Этот метод обычно реализуется в программном обеспечении для использования с шаблонами, извлеченными с цифровых носителей, хотя фундаментальный метод может быть использован для физического исследования некоторых шаблонов. Этот метод возник из фрактального анализа и используется в нем до сих пор. Он также находит применение в смежных областях, таких как лакуарность и мультифрактальный анализ.

Чтобы выполнить фрактальный анализ наших образцов (387 объектов), необходимо отсканировать побег, не отделяя от него корень. Все изображения соответствуют единому стандарту в 2379×3508 пикселей при 300dpi, для того чтобы была возможность правильно

соотнести результаты. В дальнейшем изображения, полученные для фрактального анализа, были преобразованы в черно-белые изображения, т. е. бинарные изображения (рис. 2). В последствии, двоичные изображения были обработаны с помощью программного обеспечения MATLAB (MathWorks Ltd., Натик, Массачусетс, США) и фрактальные размеры каждого растения были получены с помощью метода Box-counting-a, который чаще других используется для оценки фрактальной размерности.



1 — фрактальная размерность, полученная после расчёта; 2 — бинарное изображение; 3 — изображение, полученное со сканера

Рисунок 2. Этапы проведения расчета фрактальной размерности (составлено автором)

После получения всех значений, данные были внесены в таблицу программы Excel для получения средних значений по группам образцов.

2. Результаты

Было проведено два эксперимента по проведению рекультивации с помощью биоугля и микоризы в лабораторных условиях. Порядок проведения экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Порядок проведения экспериментов № 1 и № 2

№	Дата	Ход исследования
Эксперимент № 1 Восстановление почвы с применением биоугля		
1	21.02.23	Отбор и подготовка 30 образцов почвы, из которых 10 — контрольные, 10 — с 2 % нефти, 10 — с 3 % нефти
2	28.02.23	Внесение биоугля в пробы
3	07.03.23	Посадка семян овса обыкновенного (5 семян в каждую пробу)
4	31.03.23	Измерение фитотоксичности
5	01.04.23	Проведение фрактального анализа
Эксперимент № 2 Восстановление почвы с применением биоугля и микоризы		
1	04.04.23	40 образцов почвы, из которых 10 — контрольные, 10 — с 2 % нефти, 10 — с 6 % нефти, 10 — с 10 % нефти
2	11.04.23	Внесение биоугля и микоризы
3	18.04.23	Посадка семян овса обыкновенного (10 семян в каждую пробу)
4	12.05.23	Измерение фитотоксичности
5	13.05.23	Проведение фрактального анализа

Составлено автором

Для лучшей наглядности и понимания эффективности рекультивации после нефтезагрязнений необходимо было условно назвать образцы. В рамках экспериментов образцы условно были названы согласно таблице 2.

Таблица 2

Условные обозначения образцов в рамках эксперимента

№ п/п	Условное обозначение	Пояснения
Эксперимент № 1 Восстановление почвы с применением биоугля		
1	К	контрольные образцы без добавления нефти и биоугля
2	2wB	образцы, содержащие 2 % нефти без биоугля
3.	2B	образцы, содержащие 2 % нефти с добавлением биоугля
4	3wB	3wB — образцы, содержащие 3 % нефти без биоугля
5	3B	3B — образцы, содержащие 3 % нефти с добавлением биоугля
Эксперимент № 2 Восстановление почвы с применением биоугля и микоризы		
1	К(1-5)	контрольные образцы без добавления нефти, биоугля и микоризы
2	К(6-10)	контрольные образцы с биоуглём и микоризой
3	2BM	образцы, содержащие 2 % нефти с добавлением биоугля и микоризы
4	2wBM	образцы, содержащие 2 % нефти без биоугля и микоризы
5	6BM	образцы, содержащие 6 % нефти, с добавлением биоугля и микоризы
6	6wBM	образцы, содержащие 6 % нефти, без биоугля и микоризы
7	10BM	образцы, содержащие 10 % нефти с добавлением биоугля и микоризы
8	10wBM	образцы, содержащие 10 % нефти, без биоугля и микоризы

Составлено автором

Результаты проведения первого и второго эксперимента представлены на рисунке 3.

На данных графиках изображены результаты измерения длин стеблей и корней всех образцов, результаты всхожести растений и масса образцов.

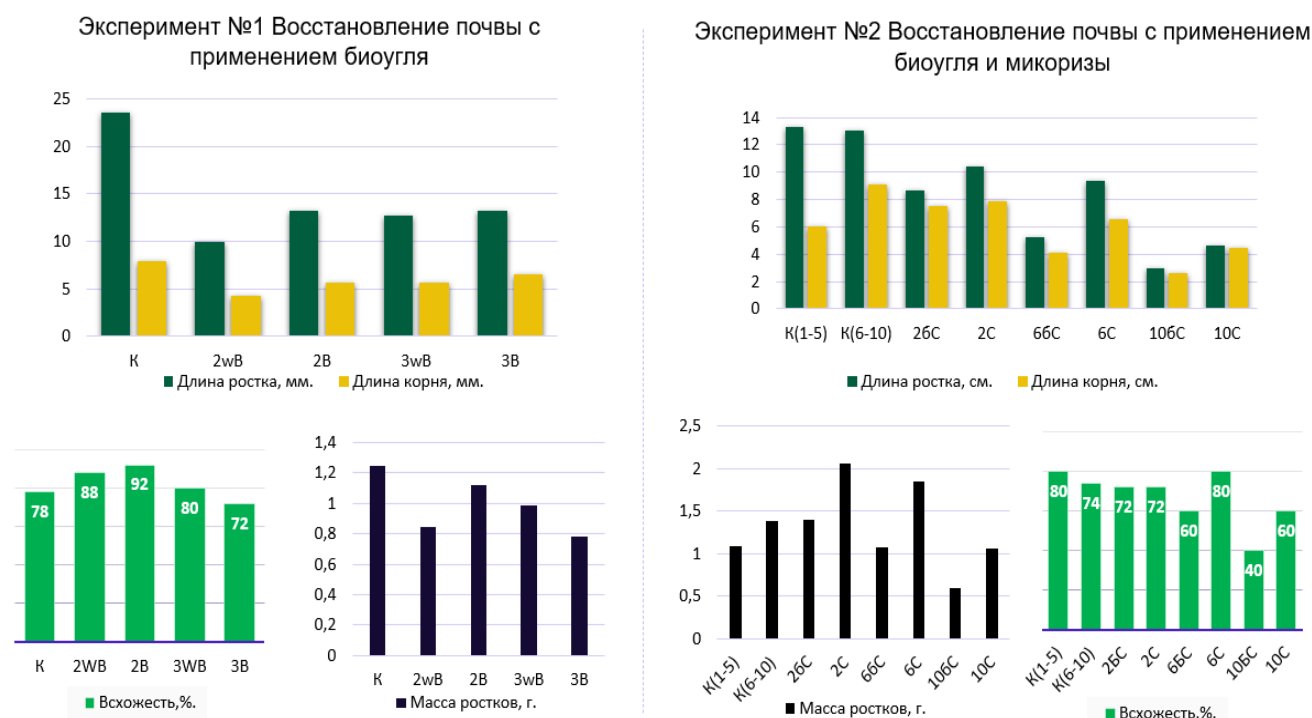


Рисунок 3. Результаты проведения анализа эффективности проведения рекультивации при помощи метода фитотоксичности (составлено автором)

После проведения экспериментов был проведен фрактальный анализ всех образцов растений. Результаты средней величины фрактальной размерности в рамках одной группы образцов представлены на рисунке 4.

В таблице 3 приведены значения фрактальной размерности каждого растения.

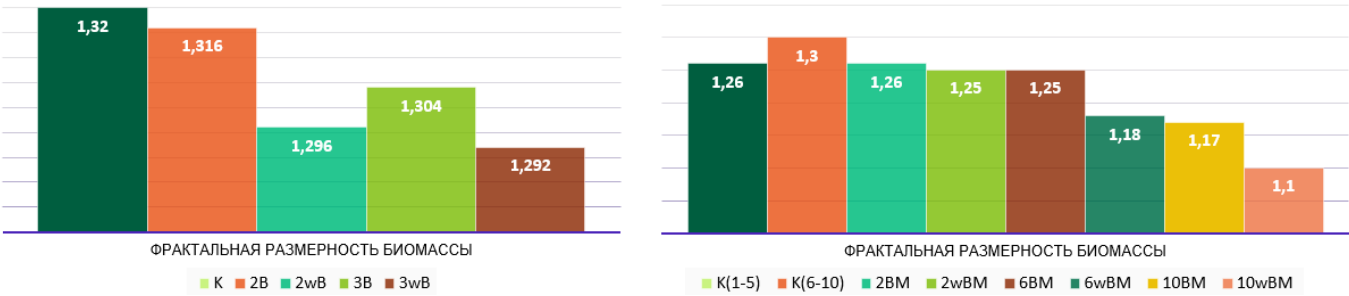


Рисунок 4. Результаты анализа эффективности проведения рекультивации при помощи фрактального анализа биомассы (составлено автором)

Таблица 3

Значения фрактальной размерности биомассы обследованных образцов

Наименование группы ростков												
2B	2wB	3B	3wB	K	2BM	2wBM	6BM	6wBM	10BM	10 wBM	K1-5	K6-10
1,32	1,39	1,33	1,31	1,33	1,08	1,34	1,30	1,26	1,20	0,99	1,35	1,31
1,34	1,21	1,35	1,37	1,29	1,13	1,27	1,13	1,11	1,26	1,06	1,33	1,32
1,32	1,28	1,23	1,36	1,17	1,21	1,11	1,29	1,32	1,12	1,22	1,00	1,24
1,19	1,33	1,36	1,37	1,31	1,3	1,38	1,28	1,25	1,29	1,12	1,34	1,33
1,28	1,26	1,34	1,31	1,27	1,32	1,27	1,25	1,16	1,23	1,16	1,35	1,27
1,35	1,32	1,32	1,28	1,32	1,32	1,40	1,12	1,28	1,25	1,10	1,25	1,31
1,34	1,33	1,30	1,34	1,37	1,34	1,33	1,16	1,21	1,21	1,02	1,16	1,24
1,27	1,26	1,40	1,38	1,33	1,30	1,02	1,13	1,32	1,19	1,05	1,15	1,29
1,33	1,30	1,32	1,37	1,36	1,34	1,19	1,30	1,31	1,30	0,94	1,31	1,28
1,26	1,31	1,34	1,32	1,35	1,37	1,23	1,29	0,96	1,20	1,16	1,33	1,32
1,36	1,17	1,39	1,28	1,33	1,10	1,24	1,26	0,96	1,26	0,98	1,23	1,37
1,35	1,32	1,19	1,20	1,25	1,37	1,31	1,30	0,99	1,35	1,01	1,29	1,29
1,35	1,33	1,07	1,11	1,36	1,28	1,19	1,32	0,92	1,14	1,08	1,29	1,27
1,22	1,36	1,31	1,34	1,32	1,37	1,14	1,30	1,05	1,24	1,19	1,28	1,28
1,34	1,36	1,30	1,28	1,34	1,33	1,13	1,32	1,12	1,20	1,26	1,15	1,37
1,32	1,21	—	1,33	1,31	1,33	1,24	1,29	1,01	1,08	1,04	1,15	1,34
1,28	—	—	1,34	1,30	1,35	1,21	1,29	1,27	1,15	1,23	1,23	1,33
1,36	—	—	1,28	1,39	1,32	1,26	1,35	1,19	1,13	1,07	1,07	1,32
1,33	—	—	0,99	1,33	1,34	0,98	0,99	1,21	1,14	1,08	1,30	1,38
1,34	—	—	—	1,33	1,30	1,31	1,34	1,06	1,09	0,91	1,31	1,23
1,39	—	—	—	1,30	1,35	1,39	1,29	1,25	1,09	1,17	1,33	1,21
—	—	—	—	1,36	1,06	1,25	1,31	1,16	1,16	1,10	1,32	1,35
—	—	—	—	1,33	1,39	1,39	1,09	1,30	1,25	1,21	1,36	1,30
—	—	—	—	1,35	1,29	1,20	1,28	1,22	1,00	1,05	1,33	1,12
—	—	—	—	1,35	1,30	1,05	0,92	1,24	1,01	—	1,09	1,34
—	—	—	—	1,31	1,31	1,27	1,25	1,15	0,96	—	1,27	1,33
—	—	—	—	0,93	1,19	0,98	1,31	1,25	1,09	—	1,31	1,31
—	—	—	—	1,30	1,20	1,13	1,29	1,08	—	—	1,24	1,19
—	—	—	—	1,32	1,31	1,29	1,35	1,23	—	—	1,31	1,26
—	—	—	—	1,33	1,29	1,24	1,32	1,01	—	—	1,32	1,35
—	—	—	—	1,31	1,08	1,28	1,29	1,19	—	—	1,27	1,36
—	—	—	—	1,38	1,10	1,26	1,30	1,32	—	—	1,28	—
—	—	—	—	1,33	1,28	1,27	1,30	1,17	—	—	1,33	—
—	—	—	—	1,42	1,30	1,16	0,94	1,22	—	—	1,30	—
—	—	—	—	1,40	1,06	1,34	1,24	1,22	—	—	1,33	—
—	—	—	—	1,32	1,16	1,28	1,38	1,17	—	—	1,306	—
—	—	—	—	1,37	1,29	1,35	1,31	—	—	—	1,11	—
—	—	—	—	1,36	1,21	1,35	1,20	—	—	—	1,26	—
—	—	—	—	1,37	0,98	1,34	1,18	—	—	—	1,21	—
—	—	—	—	—	—	—	1,05	—	—	—	1,13	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,25	—
Средние значения												
1,32	1,316	1,296	1,304	1,292	1,26	1,3	1,26	1,25	1,25	1,18	1,17	1,1

Составлено автором

3. Обсуждение

Результаты проведения измерения показателей по методу фитотоксичности (рис. 3), показали в первом эксперименте, что образцы, в которых был использован биоуголь на порядок лучше по показателям длины ростка и корня образцы чем образцы без биоугля. Но образцы 3В проигрывают в показателях всхожести и массы ростков. В эксперименте № 2 по результатам измерений следует вывод, что образцы, в которые были внесены биоуголь и микориза по всем параметрам превосходят образцы, в которых не было данных компонентов, отдельно нужно отметить длину корней и их разветвлённость в образцах с микоризой, выигрыш в длине составляет около 2-х раз, в каждом случае.

По итогам проведения фрактального анализа в первом эксперименте выявлено, что образцы в которых был применён биоуголь в качестве сорбента имеют большую фрактальную размерность биомасс, относительно образцов с той же концентрацией нефти, что говорит об эффективности использования биоугля в качестве сорбента, в результате обработки полученных результатов анализа во втором эксперименте, выявлено, что при добавлении микоризы увеличивается эффективность рекультивации с биоуглём, т. к. их сочетание приводит к увеличению фрактальной размерности биомасс, даже при более высоких концентрациях нефти в загрязнённой земле. Наиболее заметен результат в сравнении образцов групп с 10 % и 6 % концентрации нефти. Средние значения фрактальной размерности вынесены в диаграммы (рис. 4), значения фрактальной размерности биомассы сведены в итоговой таблице (табл. 3).

Заключение

Таким образом, сопоставление результатов инструментального метода и предлагаемого фрактального метода анализа показало, что методы коррелируют по своим результатам, следовательно применение фрактального анализа может стать эффективным оперативным методом оценки эффективности процесса рекультивации. Выявлено, что биоуголь является эффективным сорбентом для применения в рекультивации нефтешламов, который в сочетании с микоризой даёт стабильный и быстрый результат в восстановлении почв и их технических показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка полимерных композиций на основе возобновляемые ресурсов / А.Д. Краев, Д.А. Бояринцев, У.А. Шестакова, А.А. Бурков // Технология органических веществ: Материалы 87-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 января — 17 2023 года / Отв. за издание И.В. Войтов. — Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2023. — С. 310–312. — EDN KKZKTV.
2. Kuzyakov, Y. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ^{14}C analysis / Y. Kuzyakov, I. Bogomolova, B. Glaser // Soil Biology and Biochemistry. — 2014. — Vol. 70. — P. 229–236. — DOI 10.1016/j.soilbio.2013.12.021. — EDN SFRSAL.
3. Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. GCB Bioenergy 8: 512–523.

4. Идентификация, симбиотическая эффективность и активность коллекционных штаммов грибов арбускулярной микоризы / А.П. Юрков, А.А. Крюков, Л.М. Якоби [и др.] // Актуальная биотехнология. — 2017. — № 2(21). — С. 270а–274. — EDN ZXFABZ. Смит С.Э., Рид Д.Дж. Микоризный симбиоз. 3-е изд. Academic Press, Нью-Йорк, 2008.
5. Baum, C., El-Tohamy, W., & Gruda, N. (2015). Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Scientia horticulturae*, 187, 131–141.
6. Новикова, А.Л. Фиторемедиация почв / А.Л. Новикова, М.В. Чубик // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения: сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. — Томск: Изд-во «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 2014. — С. 52–54.
7. Максимова, Н.Б. Оценка токсичности и загрязненности почв методом фитоиндикации / Н.Б. Максимова, Г.Г. Морковкин, А. Лаврентьева // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2003. — № 2(10). — С. 106–112. — EDN PELVRL.
8. Fedeli, R., Alexandrov, D., Celletti, S., Nafikova, E., & Loppi, S. (2023). Biochar improves the performance of *Avena sativa* L. grown in gasoline-polluted soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(11), 28791–28802.
9. Hu, Y.; Shen, J.; Qi, Y.; Hu, Y.; Shen, J.; Qi, Y. Estimation of Rice Biomass at Different Growth Stages by Using Fractal Dimension in Image Processing. *Appl. Sci.* 2021, 11, 7151. [CrossRef].
10. Каюков, И.Ю. Фрактальный анализ сложных текстурных изображений / И.Ю. Каюков // Международный студенческий научный вестник. — 2023. — № 1. — С. 27. — DOI 10.17513/msnv.21119. — EDN AJBHPR.

Shaihulislamov Yan Ramilevich

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: yanmarley99@gmail.com; yana.levchenko.2014@bk.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1225601

Nafikova Elvira Valerikovna

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

Alexandrov Dmitry Valeryevich

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: dmutruurus@gmail.com

Sidorova Arina Nikolaevna

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: Arinasidorova303@gmail.com

Levchenko Yana Maksimov

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia
E-mail: yana.levchenko.2014@bk.ru

The use of fractal analysis to determine the effectiveness of soil reclamation after crude oil pollution in assessing the biomass of the *avena sativa* bioindicator plant

Abstract. In the conditions of active development of technogenic-natural landscapes, the destruction of soil cover is becoming an increasingly acute environmental problem. Special attention should be paid to the issue of negative consequences of oil and oil product spills, which cause serious damage to soils and ecosystems, reducing biodiversity, soil fertility and damaging water resources. Accidents during the transport of oil and oil products exacerbate the situation, making soil remediation an important task for ensuring environmental sustainability. Effective soil remediation after oil contamination remains a complex problem requiring innovative approaches. Existing soil remediation methods are often ineffective, especially when dealing with large areas and difficult climatic conditions. The development of integrated methods for assessing soil condition and monitoring the soil remediation process is necessary to ensure environmental sustainability. The authors of the study propose to use the method of fractal dimension analysis to assess the effectiveness of oil-contaminated soil remediation. This approach uses a biochar and mycorrhiza-based sorbent to help increase plant germination and stimulate plant growth in contaminated soil. Experimental methods for analysing soil phytotoxicity and measuring the fractal dimension of green plant biomass allowed the evaluation of different soil remediation scenarios. The study showed that the addition of a biochar-based sorbent significantly improves plant germination and promotes plant biomass growth even under oil-contaminated conditions. The new method of fractal dimension analysis confirmed its efficiency and accuracy in assessing changes in green biomass, which makes it a promising tool for rapid assessment of soil cover condition and efficiency of remediation measures. The results obtained provide valuable information for improving soil remediation methods and improving the ecological state of natural ecosystems. The use of biochar-based sorbents and fractal dimension analysis methods opens up new opportunities for developing effective strategies for the rehabilitation of contaminated territories and increasing the resilience of ecosystems to external impacts.

Keywords: bioindication; common oats (*Avena sativa*.); geoecological assessment; fractal analysis; environmental assessment; biochar; mycorrhiza