Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.62.86.009

УДК 504.054

Э.В. Нафикова, И.И. Ахияров, Д.В. Александров, А.Н. Сидорова

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме геоэкологической оценки земель, загрязненных нефтью и нефтепродуктами в результате деятельности нефтедобывающего и нефтетранспортного комплексов. Проанализированы основные источники загрязнения, включая аварийные разливы при транспортировке, и их негативное воздействие на почвенные экосистемы. Проведен системный обзор и сравнительный анализ современных методов оценки нефтезагрязненных почв, включая химические, биологические, геофизические и дистанционные. Выявлены их преимущества, недостатки и области применения. С использованием программного обеспечения VOSviewer выполнен кластерный анализ ключевых слов публикаций, который выявил две основные взаимосвязанные области исследований: технологии очистки, практическую экологию и микробиолого-генетические аспекты деградации загрязнителей. В качестве перспективного направления предложен инновационный метод оценки фитотоксичности по эффективности роста растений-биотестов на основе расчета фрактальной размерности зеленой биомассы листьев растений, реализованный в виде авторской программы для ЭВМ. Данный подход позволяет оперативно и неинвазивно оценивать фитотоксичность почв и эффективность рекультивационных мероприятий.

Ключевые слова: нефтезагрязнение, геоэкологическая оценка, кластерный анализ, рекультивация, фитотоксичность, биоиндикация, фрактальный анализ, фрактальная размерность.

Для цитирования: Методологические подходы к геоэкологической оценке нефтезагрязненных земель / Э.В. Нафикова, И.И. Ахияров, Д.В. Александров, А.Н. Сидорова // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып.1. С. 129–144. DOI: 10.35634/UdSU.2026.62.86.009

Введение

Нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленности остаются стратегически важными отраслями для экономики Российской Федерации.

Согласно данным Росстата, доходы от добычи полезных ископаемых в 2023 году составили 12,4% ВВП страны [1]. Однако интенсивное развитие этих отраслей сопряжено с существенным негативным воздействием на окружающую среду, в частности, с загрязнением земель. Основными источниками нефтезагрязнения являются аварийные разливы при транспортировке по магистральным трубопроводам, количество которых, по данным Минэнерго России, остается значительным (в 2021 году зафиксировано 5880 порывов) [2], а также технологические потери на всех этапах добычи и переработки.

Попадание нефти в почву приводит к ее деградации, снижению плодородия, нарушению микробиологических процессов и гибели растительности [3]. Долговременное сохранение токсичных компонентов нефти в окружающей среде усугубляет экологические риски [1]. В связи с этим разработка эффективных методологических подходов к геоэкологической оценке нефтезагрязненных земель является важной научно-практической задачей, необходимой для обоснования мероприятий по рекультивации и восстановлению нарушенных территорий.

1 Анализ состояния проблемы нефтезагрязненных почв

Образование отходов и загрязнение окружающей среды являются неотъемлемыми спутниками нефтедобывающей деятельности. По данным государственного доклада Минприроды России, в 2023 году при добыче сырой нефти и газа было образовано 8019,9 тыс. тонн отходов [3,4]. Несмотря на некоторое снижение показателя по сравнению с 2022 годом, общая динамика за последние годы остается напряженной (рис.1).

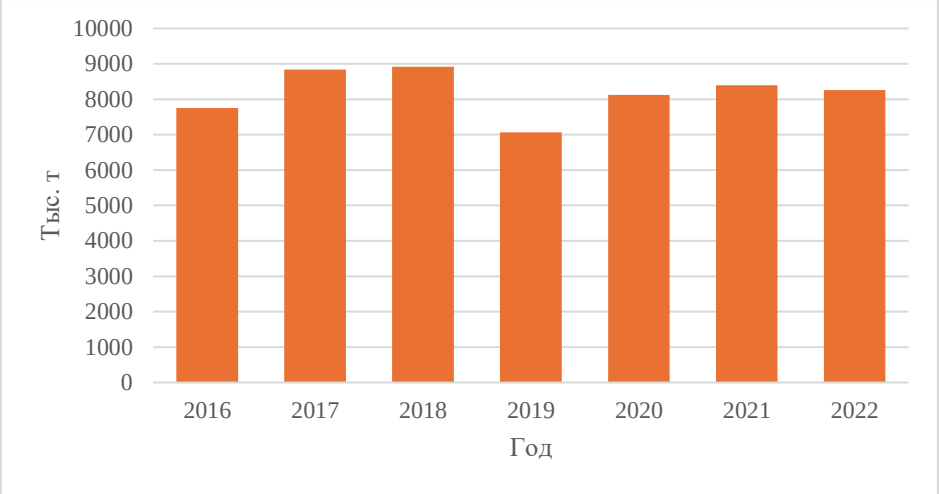


Рис. 1. Объем образования отходов при добыче сырой нефти и газа

Наиболее опасными с экологической точки зрения являются аварийные разливы, связанные с разгерметизацией трубопроводов. Помимо прямых экономических потерь (в 2021 году потеряно 94 тыс. тонн нефти), они наносят значительный экологический ущерб, который может в сотни раз превышать стоимость утраченного продукта [6]. Нефтезагрязнение приводит к образованию нарушенных земель – участков с поврежденным почвенным покровом, непригодных для целевого использования [8]. Статистика показывает, что, несмотря на растущие объемы рекультивации, площадь вновь образуемых нарушенных земель вследствие утечек нефтепродуктов остается стабильно высокой (рис. 2) [7].

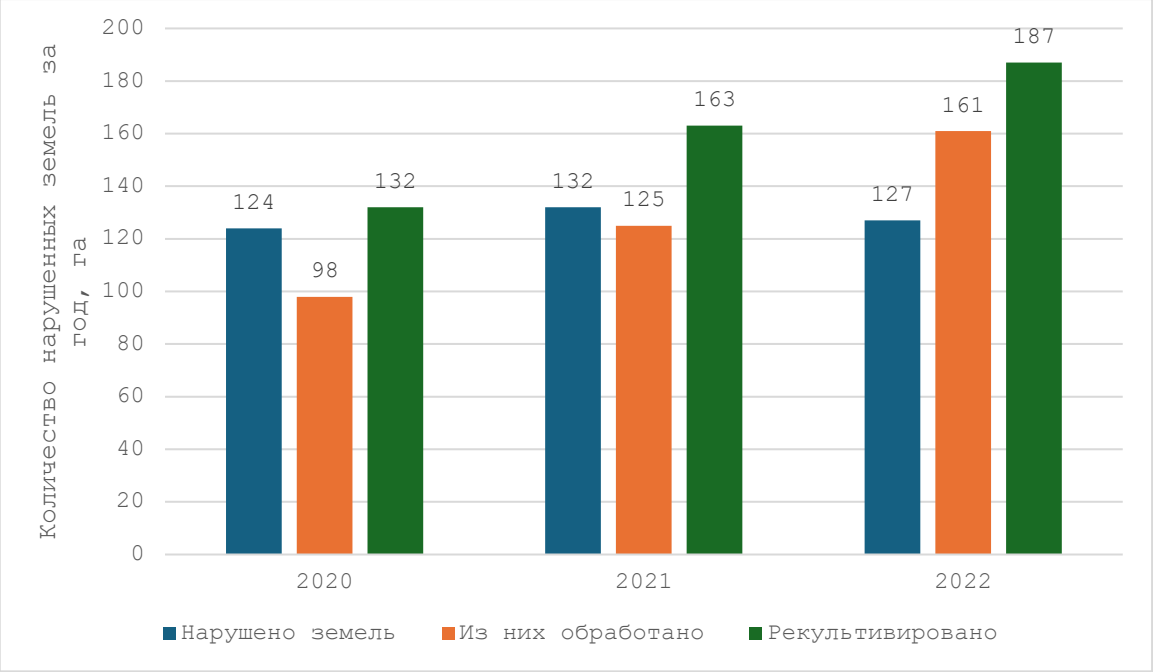


Рис. 2. Площадь нарушенных и отработанных земель вследствие утечек при транзите нефти, газа, продуктов нефтепереработки [7]

Попадание нефти на почву приводит к ее деградации, снижению плодородия и гибели растений. Токсичные вещества, содержащиеся в нефти, нарушают микробиологические процессы в почве, что замедляет разложение органических веществ и ухудшает структуру почвы. В результате страдают наземные экосистемы, уменьшается биоразнообразие, и восстановление таких территорий может занять длительное время [9].

Некоторые компоненты нефти способны сохраняться в окружающей среде на протяжении многих лет, оказывая хроническое токсическое воздействие на экосистемы. Это может приводить к изменениям в пищевых цепях, снижению численности популяций и изменению видового состава сообществ. Особую опасность представляют разливы нефти в арктических регионах, где низкие температуры замедляют процессы разложения нефти, увеличивая длительность ее негативного воздействия на окружающую среду [10].

Для взвешенного принятия решений по рекультивации используются различные методы геоэкологической оценки нефтезагрязненных земель.

2 Методы геоэкологической оценки нефтезагрязненных земель

Существующие методы геоэкологической оценки можно систематизировать на несколько групп, каждая из которых имеет свою область применения, преимущества и ограничения (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов геоэкологической оценки нефтезагрязненных земель

Название метода	Описание способов	Преимущества	Недостатки	Ссылка на источник
Химические методы				
Газовая хроматография (ГХ)	Анализ летучих органических соединений (ЛОС) в пробах почвы	Высокая точность и чувствительность, позволяет идентифицировать компоненты нефти	Дорогостоящее оборудование, сложность проведения анализа, требует специальной подготовки проб	[11]
Спектрофотометрия	Измерение поглощения света раствором почвенного экстракта	Быстрый и относительно недорогой метод	Низкая специфичность может давать неточные результаты при наличии других веществ в почве	[12]
Масс-спектрометрия (МС)	Анализ ионов образца для определения его состава	Высокая точность и чувствительность позволяет идентифицировать многие соединения	Дорогое оборудование, сложность проведения анализа	[11]
Биологические методы				
Биоиндикация	Использование живых организмов (растений, микроорганизмов) для оценки уровня загрязнения. Интегральный показатель отражает долговременное воздействие	Относительно недорогой, дает информацию о комплексном воздействии загрязнения	Зависит от многих факторов (климат, вид организма), может быть неспецифичен	[13]

Продолжение табл. 1

Геофизические методы				
Электроразведка	Измерение электрических свойств почвы	Быстрый и относительно недорогой метод, позволяет оценить пространственное распределение загрязнения.	Низкая разрешающая способность, может быть неточным в неоднородных почвах.	[14]
Сейсморазведка	Изучение скорости распространения сейсмических волн в почве.	Высокая разрешающая способность, позволяет обнаружить подземные резервуары нефтепродуктов.	Дорогостоящий метод, требует специального оборудования и опыта.	[14]
Удаленные методы				
Аэрофотосъемка и спутниковые снимки	Анализ изображений для выявления признаков загрязнения.	Возможность оценки больших территорий, относительно низкая стоимость.	Низкое разрешение, зависит от погодных условий.	[15]

Представленные методы анализа загрязнения почв нефтепродуктами можно разделить на: химические, биологические, геофизические и дистанционные, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками.

Химические методы (газовая хроматография, спектрофотометрия, Масс-спектрометрия) обеспечивают высокую точность и чувствительность, позволяя точно идентифицировать состав загрязняющих веществ. Однако они требуют дорогостоящего оборудования, сложной подготовки проб и квалифицированного персонала.

Биологические методы (биоиндикация) дают интегральную оценку загрязнения, отражая его долговременное воздействие на экосистему. Они относительно дешевы, но зависят от внешних факторов (климат, вид организмов) и могут быть неспецифичны.

Геофизические методы (электроразведка, сейсморазведка) позволяют быстро оценить распределение загрязнения в почве и обнаружить подземные резервуары. Однако они имеют низкую разрешающую способность или требуют значительных затрат.

Дистанционные методы (аэрофотосъемка, спутниковые снимки) эффективны для мониторинга больших территорий и предварительной оценки загрязнения. Однако они зависят от погодных условий и обладают ограниченной детализацией.

Обобщая эти данные, можно сделать выводы, что:

Для точной идентификации состава загрязнителей оптимальны газовая хроматография и масс-спектрометрия.

Для быстрой и экономичной оценки подходят спектрофотометрия и биоиндикация.

Для крупномасштабного мониторинга целесообразно применять аэрофотосъемку и геофизические методы.

Таким образом, выбор метода зависит от целей исследования, бюджета, требуемой точности и масштабов загрязнения.

3 Кластерный анализ ключевых слов «методов оценки почвы»

Для выявления современных тенденций в области исследований был проведен библиометрический анализ научных публикаций с использованием программного обеспечения VOSviewer по запросу «методы оценки почвы». В результате было идентифицировано два основных кластера (рис. 3):

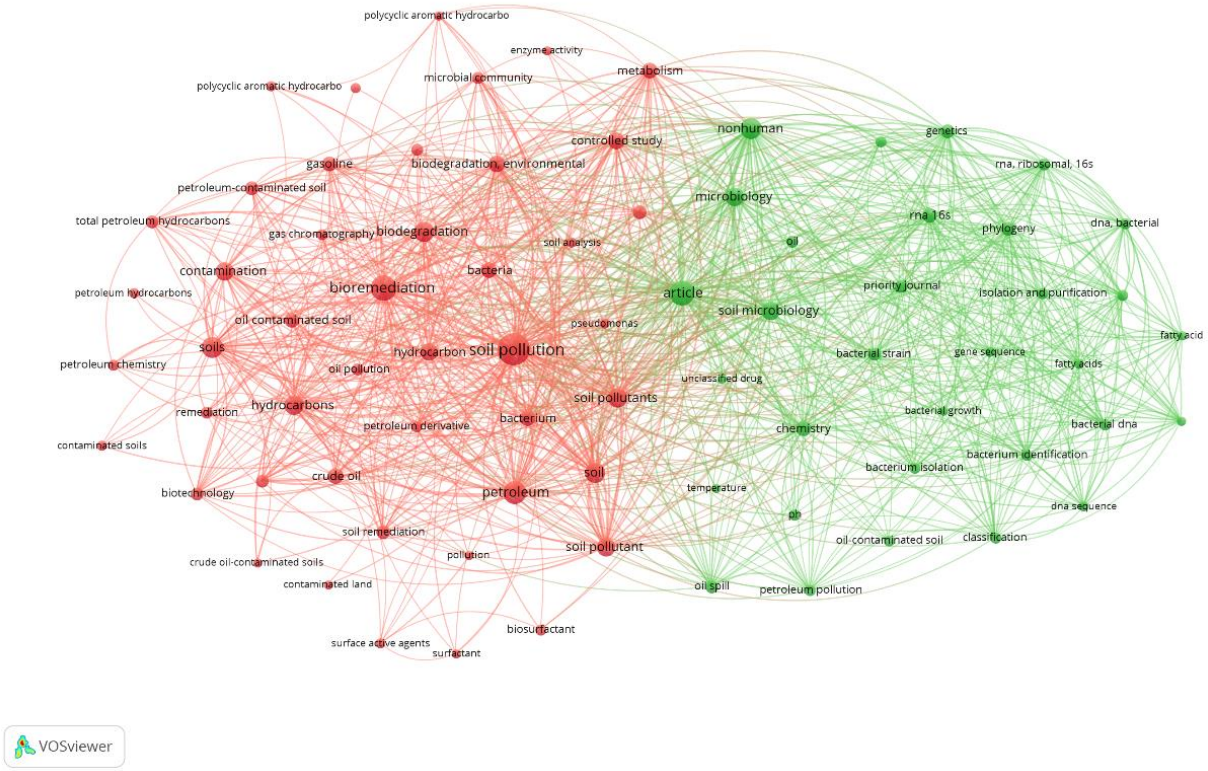


Рис. 3. Сетевая визуализация «методы оценки почвы»

Кластер 1 (46 элементов/красный), доминирующий элемент – загрязнение почвы, другие элементы: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), ферментативная активность, метаболизм, микробное сообщество, контролируемое исследование, бензин, биодеградация, экологический, нефтезагрязнённая почва, газовая хроматография, общие нефтяные углеводороды, анализ почвы, бактерии, нефтяные углеводороды, загрязнение, биоремедиация, псевдомонады, почвы, химия нефти, углеводород, нефтяное загрязнение, загрязнённые почвы, ремедиация, нефтепродукт, биотехнология, сырая нефть, нефть, почва, восстановление почвы, загрязнённая земля, поверхностно-активные вещества (ПАВ), биосурфактант.

Кластер 2 (32 элементов/ зеленый), доминирующий элемент – статья, другие элементы: нечеловеческий, генетика, рРНК, рибосомальная, 16S,

микробиология, РНК 16S, филогения, ДНК, бактериальная, нефть, почвенная микробиология, приоритетный журнал, выделение и очистка, жирная кислота, жирные кислоты, последовательность гена, бактериальный штамм, неклассифицированное вещество, рост бактерий, бактериальная ДНК, идентификация бактерий, выделение бактерий, химия, температура, pH, нефтезагрязнённая почва, классификация, последовательность ДНК, разлив нефти, нефтяное загрязнение.

Визуализация демонстрирует тесную взаимосвязь между этими двумя направлениями, что подчеркивает важность междисциплинарного подхода в решении проблем оценки и восстановления нефтезагрязненных земель.

4 Разработка автоматизированной программы оценки на основе фрактального анализа

Для интегральной оценки токсичности окружающей среды применяются методы биоиндикации и биотестирования [16]. Методы биотестирования основаны на применении биотестов – живых организмов, выделенных в лабораторную культуру. Критерием токсичности среды является подавление основных жизненных функций тест-образца.

В качестве одного из этапов оценки фитотоксичности почв предлагается внедрение метода расчета фрактальной размерности зеленой биомассы листьев растений. Метод основан на том, что уровень стресса (в данном случае, нефтяного загрязнения) влияет на морфогенез листовой пластинки, что отражается в изменении ее фрактальной размерности.

Разработан алгоритм (рис. 4) и программное обеспечение (Свидетельство о госрегистрации №2024661643 [17], рис 5.), реализующее метод box-counting для расчета величины фрактальной размерности скана листовой пластинки растения-биотеста. Программа позволяет количественно оценить степень угнетения растения по сравнению с контролем, что является показателем фитотоксичности почвы.

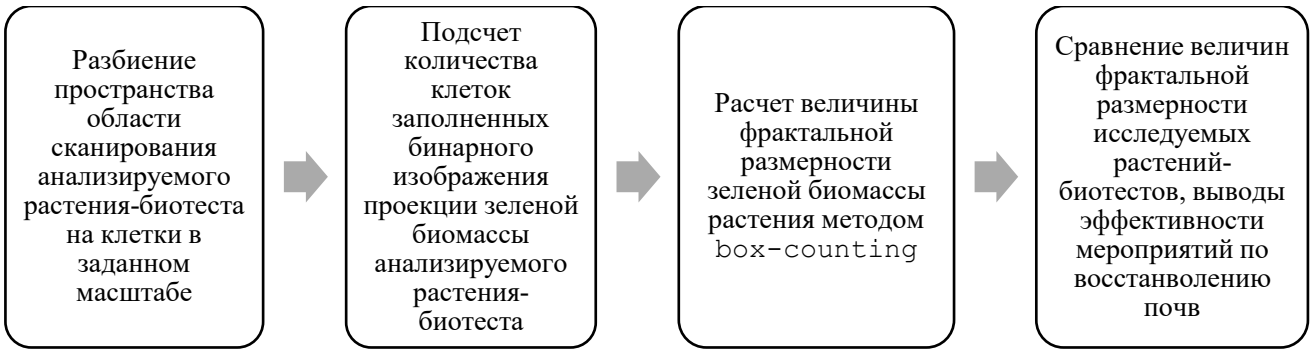


Рис. 4. Алгоритм работы программы

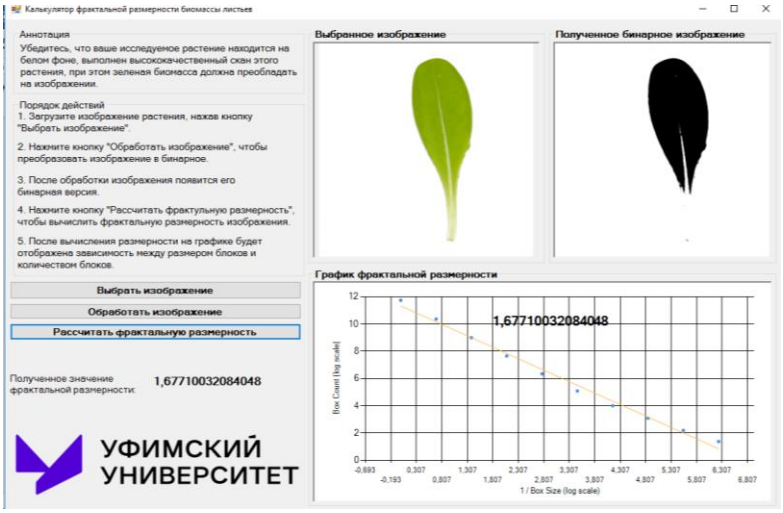


Рис. 5. Пример работы программы на образце

Данный подход является оперативным, неинвазивным и позволяет проводить оценку в полевых или лабораторных условиях без сложной пробоподготовки, что выгодно отличает его от ряда традиционных методов.

Выводы и рекомендации

Проведенный анализ подтвердил актуальность и комплексный характер проблемы оценки нефтезагрязненных земель. Существующий арсенал методов позволяет решать широкий спектр задач, однако большинство из них требуют значительных ресурсов и проводятся в стационарных условиях.

Кластерный анализ научных публикаций выявил два ключевых взаимосвязанных направления: прикладные технологии ремедиации

и фундаментальные микробиологические исследования, что указывает на необходимость интеграции этих областей знания.

Предложен и программно реализован инновационный метод оценки фитотоксичности на основе фрактального анализа биомассы растений. Этот подход обладает значительным потенциалом для использования в системе мониторинга и контроля эффективности рекультивационных работ благодаря своей оперативности, наглядности и относительно низкой стоимости.

Для комплексной геоэкологической оценки целесообразно применять комбинацию методов: дистанционных и геофизических для выявления зон загрязнения, химических для точной идентификации загрязнителей и биологических (включая предложенный метод фрактального анализа) для интегральной оценки состояния экосистемы и эффективности восстановительных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О производстве и использовании валового внутреннего продукта в 2023 г.: государственный доклад Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». Источник: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/52_05-04-2024.html (дата обращения 15.10.2024).
2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 г.: государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. 684 с.
3. Ключников Олег Андреевич. Влияние инноваций на технологическое развитие нефтедобывающего комплекса России // Современные технологии управления. 2024. №.2 (106). 3 с.
4. Государственный доклад О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году // Министерство Природных ресурсов и экологии Российской Федерации Доступ из справ.-правовой системы

«КонсультантПлюс».Источник: https://2022.ecology-gosdoklad.ru/pokazateli/ekologicheskie-pokazateli-rekomendovannye-resheniyami-eek-oon/othody/ (дата обращения 16.10.2024)

5. Булатов В. И., Игенбаева Н. О., Нанишвили О. А. Отходы нефтегазового комплекса как технологический индикатор геоэкологического состояния регионов России // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7, № 8. С. 46–55.
6. Корнеева С.А. Анализ причин возникновения аварий на магистральных трубопроводах // Вестник магистратуры. 2019. С. 21-23.
7. Основные показатели охраны окружающей среды // Федеральная служба государственной статистики (Росстат): статистический бюллетень. М., 2023.
8. О проведении рекультивации и консервации земель» (вместе с «Правилами проведения рекультивации и консервации земель: постановление Правительства РФ от 10.07.2018 N 800 (ред. от 07.03.2019). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». Источник:https://rpn.gov.ru/upload/iblock/661/ei42bdpqeo2mtwbqmtb4yyzxhothin38/Postanovlenie-Pravitelstva-RF-ot-10.07.2018-N-800-O-provedenii-rekultivatsii-i-konservatsii-zemel.pdf (дата обращения 16.10.2024).
9. Хайретдинова В.Р., Нафикова Э.В., Александров Д.В. Совершенствование методов рекультивации нефтезагрязненных почв с применением биоугля и микоризы // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2024. Т. 20, № 2. С. 69-72.
10. Нафикова Э.В., Шаниязова А.Ф., Александров Д.В., Хужина Р.Р. Геоэкологическая оценка нефтезагрязненных ландшафтов Республики Башкортостан // Геоинформатика. 2024. № 4. С. 57 – 69.
11. Шумилова Л. П., Куимова Н. Г. Изучение микробного сообщества городских почв методом газовой хроматографии – масс-спектрометрии // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2013. № 50. С. 121 – 125.
12. Ширшова Л. Т. и др. Применение спектрофотометрии для определения содержания гуминовых веществ в многолетнемерзлых отложениях // Криосфера Земли. 2015. Т. 19, № 4. С. 107 – 113.
13. R. Fedeli, S. Celletti, D. Alexandrov [et al.]. Biochar-mediated bioremediation: a sustainable strategy to increase Avena sativa L. tolerance to crude oil soil contamination, Environmental Science and Pollution Research. 2024, vol. 31, no. 40, pp. 52774 – 52783.
14. Хмелевской В.К. и др. Геофизические методы исследований. Петропавловск-Камчатский: изд-во КГПУ, 2004. С. 232.
15. Тронин А.А. Дистанционные методы при решении задач экологической безопасности //

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 238.

16. Чеснокова С.М., Чугай Н.В. Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды: учебное пособие. Владим.: ВГУ, 2008. 92 с.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024661643 РФ. Программа для расчета фрактальной размерности зеленой биомассы листьев растений / Д.В. Александров, Э.В. Нафикова, И.И. Ахияров [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий». 2024.

Поступила в редакцию: 27.11.2025

Сведения об авторах

Нафикова Эльвира Валериковна
Кандидат географический наук, доцент кафедры безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12, корп. 4
E-mail: vira2006@yandex.ru

Ахияров Ирек Ильшатович
Студент кафедры безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12, корп. 4
E-mail: akhiyarovii@bk.ru

Александров Дмитрий Валерьевич
Аспирант кафедры безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12, корп. 4
E-mail: dmutruu102@yandex.ru

Сидорова Арина Николаевна
Студент кафедры безопасности производства и промышленной экологии, Уфимский университет науки и технологий, Россия, 450008, Уфа, ул. Карла Маркса, д. 12, корп. 4
E-mail: arinasidorova303@gmail.com

Nafikova E.V., Akhiyarov I.I., Alexandrov D.V., Sidorova A.N.

METHODOLOGICAL APPROACHES TO GEO-ECOLOGICAL ASSESSMENT OF OIL-CONTAMINATED LANDS

Annotation. The article is devoted to the urgent problem of geoecological assessment of lands contaminated with oil and petroleum products as a result of the activities of the oil extraction and oil transport complexes. The main sources of pollution, including emergency spills during transportation, and their negative impact on soil ecosystems are analyzed. A systematic review and comparative analysis of modern methods for assessing oil-contaminated soils, including chemical, biological, geophysical, and remote methods, has been carried out. Their advantages, disadvantages, and areas of application are identified. Using VOSviewer software, a cluster analysis of publication keywords was performed, which revealed two main interconnected areas of research: cleanup technologies, practical ecology (and microbiological-genetic aspects of pollutant degradation). As a promising direction, an innovative method for assessing phytotoxicity based on the growth efficiency of test plants based on calculating the fractal dimension of the green biomass of plant leaves, implemented in the form of an author's computer program, is proposed. This approach allows for rapid and non-invasive assessment of soil phytotoxicity and the effectiveness of reclamation measures.
***Keywords*:** oil contamination, geoecological assessment, cluster analysis, reclamation, phytotoxicity, bioindication, fractal analysis, fractal dimension.

For citation: Nafikova E.V., Akhiyarov I.I., Alexandrov D.V., Sidorova A.N. [Methodological approaches to geo-ecological assessment of oil-contaminated lands]. *Upravlenie tekhnosferoi,* 2026, vol. 9, issue 1, pp. 129–144. DOI: 10.35634/UdSU.2026.62.86.009. (In Russ.).

REFERENCES

1. *O proizvodstve i ispol'zovanii valovogo vnutrennego produkta v 2023 g.: gosudarstvennyi doklad* [On the production and use of gross domestic product in 2023: state report available from the reference the legal system]. *Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlyus». Istochnik*: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/52_05-04-2024.html (Accessed: 15.10.2024). (In Russ.).
2. Klyuchnikov, O.A. "Vliyanie innovatsiy na tekhnologicheskoe razvitie neftedobyvayushchego kompleksa Rossii" [The impact of innovations on the technological development of Russia's oil extraction complex]. *Sovremennye tekhnologii upravleniya*, 2024, no. 2 (106), p. 3. (In Russ.).
3. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. *Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu* [State report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2023]. *Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlyus». Istochnik:* https://2022.ecology-

gosdoklad.ru/pokazateli/ekologicheskie-pokazateli-rekomendovannye-resheniyami-eek-oon/othody/ (Accessed: 16.10.2024). (In Russ.).

4. Bulatov, V.I., Igenbaeva, N.O. and Nanishvili, O.A. "Otkhody neftegazovogo kompleksa kak tekhnologicheskiy indikator geoekologicheskogo sostoyaniya regionov Rossii" [Oil and gas waste as a technological indicator of geoecological conditions in Russian regions]. *Byulleten' nauki i praktiki*, 2021, vol. 7, no. 8, pp. 46-55. (In Russ.).
5. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation & Lomonosov Moscow State University. *Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2021 godu* [State report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021]. Moscow, 2022, 684 p. (In Russ.).
6. Korneeva, S.A. "Analiz prichin vozniknoveniya avariy na magistral'nykh truboprovodakh" [Analysis of the causes of accidents on main pipelines]. *Vestnik magistratury*, 2019, pp. 21 – 23. (In Russ.)
7. Federal State Statistics Service (Rosstat). *Osnovnye pokazateli okhrany okruzhayushchey sredy: statisticheskiy byulleten'* [Key environmental indicators: Statistical bulletin]. *Dostup iz sprav.-pravovoi sistemy «Konsul'tantPlyus». Istochnik*: Moscow, 2023. (In Russ.).
8. Government of the Russian Federation. *Postanovleniye ot 10.07.2018 № 800 (red. ot 07.03.2019) "O provedenii rekul'tivatsii i konservatsii zemel'"* [Decree No. 800 of 10.07.2018 (as amended on 07.03.2019) "On land reclamation and conservation"]. (In Russ.).

Received: 27.11.2025

About the Authors

Nafikova Elvira Valerikovna
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of "Industrial Safety and Environmental Engineering", Ufa University of Science and Technology, 12 Karl Marx St., Bldg. 4, Ufa, Russia
E-mail: vira2006@yandex.ru

Akhiyarov Irek Ilshatovich
Student, Department of "Industrial Safety and Environmental Engineering", Ufa University of Science and Technology, 12 Karl Marx St., Bldg. 4, Ufa, Russia
E-mail: akhiyarovii@bk.ru

Alexandrov Dmitry Valerievich
Postgraduate Student, Department of "Industrial Safety and Environmental Engineering", Ufa University of Science and Technology, 12 Karl Marx St., Bldg. 4, Ufa, Russia
E-mail: dmutruu102@yandex.ru

Sidorova Arina Nikolaevna
Student, Department of "Industrial Safety and Environmental Engineering", Ufa University of Science and Technology, 12 Karl Marx St., Bldg. 4, Ufa, Russia
E-mail: arinasidorova303@gmail.com