ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Активация процессов биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем при помощи композиции органоминеральных мелиорантов

Н.Ю.Антонинова✉, А.И.Усманов, В.А.Антонов, А.В.Собенин
Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Как цитировать эту статью: Антонинова Н.Ю., Усманов А.И., Антонов В.А., Собенин А.В. Активация процессов биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем при помощи композиции органоминеральных мелиорантов // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 133-145. EDN QQWTCB

Аннотация
Данная работа посвящена оценке эффективности биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем с использованием композиции органоминеральных мелиорантов. Цель исследования – установить влияние мелиорантов на снижение фитотоксичности нефтезагрязненных органогенных почв и проследить динамику снижения концентрации нефти в почве под их воздействием. Исследование направлено на разработку экологически безопасного и устойчивого метода очистки почв от нефтяного загрязнения, который минимизирует негативное воздействие на окружающую среду и способствует восстановлению плодородия почвы. В результате экспериментально обосновано оптимальное соотношение компонентов торфо-диатомитового мелиоранта (ТДМ) для активации процессов биоремедиации нефтезагрязненных почв. Наиболее эффективным для биоремедиации нефтезагрязненных почв признано следующее соотношение компонентов ТДМ: торфа 51,5-53,5 %; сапропеля 31,0-33,5 %; диатомита 15,0-15,5 % (по массе воздушно-сухого вещества). Установлена прямая зависимость эффективности деструкции нефти в нефтезагрязненных экосистемах от внесения ТДМ в рекомендованном составе. Результаты исследований подтверждают эффективность разработанного ТДМ.

Ключевые слова
нефтезагрязненные наземные экосистемы; нефть; торфо-диатомитовый мелиорант; композиция; фитотоксичность; окислительно-восстановительный потенциал; нефтедеструкция

Финансирование
Статья подготовлена в рамках Государственного задания № 075-00410-25-00 ПР. Тема 2 (2025-2027). Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр (FUWE-2025-0002), № 1022040300092-1-1.5.1.

Поступила: 28.03.2025 ***Принята: 28.04.2026*** ***Онлайн: 28.08.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Россия является одним из мировых лидеров в добыче и экспорте углеводородов, опираясь на обширную сеть нефтепроводов, протяженность которой на территории РФ составляет около 55 тыс. км. Однако в процессе добычи и транспортировки происходят внештатные ситуации, связанные с прорывами на нефтепроводах, причиной которых, как правило, является коррозия (> 90 %), в результате большие площади земельных ресурсов оказываются выведенными из хозяйственного оборота [1-3].

Согласно данным Министерства природных ресурсов и экологии РФ, ежегодные потери составляют более 100 тыс. т нефти, что обусловливает масштабное негативное воздействие на наземные экосистемы и вызывает существенную трансформацию физико-химических свойств и структуры всех компонентов природной среды, тогда как объемы проводимой рекультивации сохраняются на критически низком уровне. Площадь нарушенных земель в результате деятельности нефтегазодобывающих компаний на конец 2023 г. достигла 596,7 тыс. га при объеме рекультивированных территорий всего 23,3 тыс. га (< 4 %).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Нефтегазоносные месторождения на территории России разведаны и отрабатываются в различных почвенно-климатических зонах, однако в основном расположены в зоне средней тайги, в границах верховых болот, которые представлены органогенными (торфяными) почвами. В связи с этим данные типы наземных экосистем в большей степени подвержены риску негативного воздействия от аварийных разливов нефти [4-6].

Для органогенных почв остаточная концентрация нефти различается в зависимости от региона и составляет от 1 до 15 г/кг на землях сельскохозяйственного назначения и от 1 до 67 г/кг на землях лесохозяйственного назначения [7, 8]. В РФ отсутствуют единые предельно допустимые концентрации нефти в почвах, что объясняется исключительной сложностью и непостоянством химического состава, характерными как для самих почв, так и для широкого спектра нефтепродуктов [9], поэтому в отдельных нефтедобывающих регионах России установлены нормативы допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации после проведения рекультивационных работ.

Многими исследованиями установлено, что с увеличением концентрации нефти в наземных экосистемах снижается концентрация доступных микроорганизмам и растениям агрохимических элементов, таких как нитратный азот, подвижный фосфор и обменный калий. Кроме того, возрастающее в результате загрязнения количество углерода нарушает баланс углерода и азота в почве, тем самым снижая ее плодородие [10-12]. Это обусловлено протекающими процессами обволакивания почвенных частиц плотной нефтяной пленкой, которая ингибирует химические и биохимические процессы в наземных экосистемах, препятствуя биодеградации нефтяных углеводородов.

Загрязнение почвы углеводородами нефти существенно меняет состав и доступность элементов для растений. Для очистки нефтезагрязненной почвы в настоящее время наиболее эффективным является метод биоремедиации, суть которого заключается в создании оптимальных условий для развития углеводородокисляющей микрофлоры [13-15]. Для активации процессов биоремедиации, как правило, в почву вносят химические удобрения, причем молекулярные соотношения элементов питания углерода (C), азота (N), фосфора (P), калия (K) должны быть следующими: C:N:P = = 100:9:1, C:N:P = 100:7,5:0,66; C:N:P = 100: 3,75:0,25; C:N:K = 100:17:6. Для развития углеводородокисляющих микроорганизмов также необходимы насыщение почвы водой, кислородом и pH, близкий к нейтральному [16-18]. Подобные условия возможно сформировать путем внесения химических удобрений или органоминеральных мелиорантов.

В отличие от мелиорантов химические удобрения имеют ряд существенных недостатков, так как их чрезмерное внесение способствует миграции составляющих компонентов в подземные воды и различные водоемы. Кроме того, результаты многолетних исследований показывают, что применение химических удобрений спустя несколько лет приводит к негативному воздействию на агрохимические и биологические свойства почвы и вследствие этого – к угнетению растительности даже после посадки сидеральных культур [19-21].

В связи с вышеизложенным необходимо провести комплексную оценку эффективности использования композиции органоминеральных мелиорантов при активации процессов биоремедиации нефтезагрязненных наземных экосистем. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи: исследовать влияние композиции органоминеральных мелиорантов на снижение фитотоксичности нефтезагрязненных органогенных почв; установить динамику снижения концентрации нефти к завершению этапа экспериментальных исследований; оценить экологическую эффективность композиции органоминеральных мелиорантов и дать рекомендации по процентному соотношению компонентов – торфа, сапропеля и диатомита.

Методы

Экспериментальные исследования проводились с использованием емкостей объемом 500 мл, в трех повторностях в течение 1 мес. Использование емкостей такого объема обусловлено необходимостью создания лимитированного пространства для развития корневой системы, что позволяет моделировать условия ограниченного доступа к питательным веществам и влаге. Данный объем гарантирует, что корневая система неизбежно и быстро войдет в контакт с загрязненным субстратом, что ускоряет проявление эффекта и сокращает время эксперимента. В противном случае в больших сосудах растение могло бы дольше избегать токсиканта, развивая корни в незагрязненной зоне.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Наблюдения в течение первого месяца являлись наиболее показательными, поскольку позволили в полной мере оценить всхожесть, начальный рост и остроту токсического стресса у растений. Сокращение срока эксперимента до 1 мес. позволяет быстро получить данные о первичном воздействии поллютантов и сделать вывод о целесообразности или нецелесообразности дальнейших полевых исследований.

Емкости для проведения исследований были выполнены из цветного полипропилена. Режим освещения поддерживали с фиксированным фотопериодом – продолжительность светового дня составляла 14 ч. В качестве источника освещения использовали фитолампы со спектральным составом, оптимизированным для процесса фотосинтеза. В каждую емкость высаживали по 10 семян овса посевного (*Avena sativa*).

В почву вносили по 400 мл нефти на 1 кг почвы, что составило 63 г/кг согласно Методике измерения массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв и донных отложений на анализаторе АН-2 (ФР.1.31.2011.11314). В качестве экстрагента был принят четыреххлористый углерод. В ходе предварительных исследований установлено, что при заданном уровне нефтяного загрязнения на данном типе почвы всхожесть семян овса посевного отсутствовала в течение месяца. Данный факт послужил основанием для выбора указанной концентрации загрязнителя в качестве модельной при проведении дальнейших экспериментов. Далее в нефтезагрязненную почву вносилась композиция мелиорантов из различных пропорций компонентов – торфа, сапропеля и диатомита в количестве 10 % от массы воздушно-сухой почвы. Влажность поддерживалась на уровне 60-70 % от полной влагоемкости загрязненной почвы с внесенными мелиорантами, что соответствует оптимальным условиям ее увлажнения.

Принимая во внимание возможный нелинейный характер функции отклика, для каждого фактора были определены три уровня варьирования. Определение максимального и минимального значений этих уровней проводилось с учетом экономической целесообразности и доступности сырья в России. В результате в составе смеси доминирует торф, за ним следуют сапропель и диатомит. Для удобства расчета значения уровней варьирования представлены в граммах, которые пересчитывали в процентном соотношении (табл.1): торф (X_1) 0,720-1,098, сапропель (X_2) 0,450-0,801, диатомит (X_3) 0,216-0,288.

Основной уровень X_i^0 и интервал варьирования ΔX_i были рассчитаны по формулам

$$X_i^0 = \frac{X_i^{\text{в}} + X_i^{\text{н}}}{2};$$

$$\Delta X_i = \frac{X_i^{\text{в}} - X_i^{\text{н}}}{2},$$

где i – номер фактора; $X_i^{\text{в}}$, $X_i^{\text{н}}$ – верхний и нижний уровни факторов.

Факторы, уровни и интервалы варьирования сведены в табл.1, где перечислены составляющие композиции в граммах/процентах.

Составлена матрица экспериментальных исследований, определены количество опытов и значения уровней факторов в каждом из них (табл.2).

При использовании композиционного плана второго порядка также применяются два дополнительных уровня – звездные плечи α и $-\alpha$, которые прибавляются к верхнему уровню и вычитаются из нижнего уровня варьирования, что обеспечивает ортогональность центрально-композиционного плана второго порядка. Поэтому количество опытов определяется по формуле

$$N = 2^n + 2n + n_0 = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15,$$

где n – количество факторов; n_0 – количество опытов на нулевом уровне, $n_0 = 1$.

С учетом количества проводимых опытов звездное плечо рассчитывается по формуле

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

Уровни	Торф (X_1)	Сапропель (X_2)	Диатомит (X_3)
Верхний	1,098/59,8	0,801/46,0	0,288/15,7
Основной	0,909/50,7	0,626/35,3	0,252/14,1
Нижний	0,720/41,5	0,450/24,5	0,216/12,5

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Матрица экспериментальных исследований

Номер эксперимента	Торф (X_1)	Сапропель (X_2)	Диатомит (X_3)
1	1,098	0,801	0,288
2	0,720	0,801	0,288
3	1,098	0,450	0,288
4	0,720	0,450	0,288
5	1,098	0,801	0,216
6	0,720	0,801	0,216
7	1,098	0,450	0,216
8	0,720	0,450	0,216
9	1,335	0,626	0,252
10	0,569	0,626	0,252
11	0,909	0,974	0,252
12	0,909	0,356	0,252
13	0,909	0,626	0,348
14	0,909	0,626	0,171
15	0,909	0,626	0,252

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{N2^n} - 2^n}{2}} = \sqrt{\frac{\sqrt{15 \cdot 2^3} - 2^3}{2}} = 1{,}215.$$

Таким образом, ортогональность центрально-композиционного плана обеспечивается соответствующим звездным плечом $\alpha = 1{,}215$ и $\alpha = -1{,}215$. Для этого один из факторов верхнего уровня экспериментального состава увеличивается на 21,5 %, а нижний уровень уменьшается на 21,5 % при фиксации остальных факторов на нулевом уровне. Например, верхний уровень концентрации торфа в составе торфо-диатомитового мелиоранта (ТДМ), составил 1,335, а нижний 0,569 при зафиксированных нулевых уровнях сапропеля 0,450 и диатомита 0,216 (табл.2, эксперименты 9, 10).

В качестве откликов, по которым принимали решение об оптимальном составе композиции органоминеральных мелиорантов, фиксировались Y_T (T, %) – уровень фитотоксичности нефтезагрязненных наземных экосистем [22], Y_{N_d} (N_d, г/кг) – показатель нефтедеструкции (снижение концентрации нефти в объекте исследований по истечении месяца), г/кг.

При исследовании фитотоксичности использовался комплексный анализ, учитывающий всхожесть семян овса посевного, длину надземной и подземной частей растения, а также фитомассу. При оценке степени фитотоксичности образцы сравнивали с контрольным (незагрязненным) образцом [23].

Обработка полученных данных была проведена с применением методов математической статистики, обеспечивающих высокую достоверность и объективность результатов. Для реализации этих методов применили комплекс современного программного обеспечения, включающий в себя Microsoft Excel для базовой обработки, Design-Expert 13 и «Тренды ФСП-1» (https://igduran.ru/soft/trends2) для углубленного анализа и планирования экспериментов [16, 24].

Материалы

Нефть. В качестве загрязнителя использовали товарную нефть Лянторского нефтегазового месторождения. Основные физико-химические показатели нефти: содержание хлористых солей – 0,1 %; серы общей – 0,99 % (сернистая); парафиновых углеводородов – 2,4 %; плотность – 894 кг/м^3 (тяжелая нефть).

Композиция органоминеральных мелиорантов. В целях повышения эффективности нефтедеструкции с использованием природного потенциала торфа, диатомита и сапропеля создана композиция – торфо-диатомитовый мелиорант [25]. В составе ТДМ:

• Верховой фрезерный торф с фракцией частиц от 0 до 10 мм. Верховой торф представляет собой продукт неполного разложения растений в условиях повышенных влажности и кислотности, что обусловливает его специфические свойства. Влажность используемого торфа варьировалась в пределах 40-60 %, а водородный показатель pH водной вытяжки находился в диапазоне 4,5-5,5, что свидетельствует о кислой реакции среды. Степень разложения органического вещества в верховом торфе не превышала 25 %, что указывает на его относительно слабо измененную структуру и высокую пористость. Зольность торфа была незначительной и составляла менее 5 %. Основные неорганические соединения, содержащиеся в торфе, включали общий азот (до 1,5 %), общие фосфор, калий и кальций (в сумме до 0,6 %). Содержание гуминовых веществ составляло 31,5-32,5 %.

• Диатомит, соответствующий ТУ 5761-001-59266087-2005. Этот природный материал представляет собой осадочную горную породу преимущественно из окаменелых остатков диатомовых

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

водорослей. Состав диатомита, %: SiO_2 73,98±0,07; $A1_2O_3$ 9,04±0,12; TiO_2 0,50±0,02; Fe 3,8±0,20; MgO 1,45±0,02; CaO 1,50±0,14; Na_2O 0,21±0,01; K_2O 0,60±0,01; P_2O_5 0,15±0,00. Потери при прокаливании 9,2±0,00 %. Показатель pH 6,25±0,25. Уникальность диатомита заключается в высоком содержании кремнезема (более 70 %) и, как следствие, развитой пористости. Именно высокая пористость обусловливает повышенную сорбционную способность диатомита по отношению к углеводородам, что подтверждено рядом научных работ [26, 27]. В рамках данного исследования применялась диатомитовая мука с фракцией частиц менее 1 мм и влажностью, не превышающей 5 %, что обеспечивало оптимальные условия для адсорбции и дальнейшего анализа.

• Сапропель, соответствующий ТУ 0135-001-94744244-2007. Сапропель – уникальное полезное ископаемое, формирующееся на дне пресноводных водоемов в условиях дефицита кислорода и высокого содержания органического вещества. Характерной особенностью сапропеля является проявление восстановительного характера его окислительно-восстановительного потенциала (ОВП < 19 мВ), что создает благоприятные условия для развития анаэробных микроорганизмов и способствует процессам разложения органики. Сапропель представлял собой однородную массу темно-бурого цвета. Его влажность не превышала 60 %, а показатель pH_{H_2O} находился в диапазоне 8,1-8,5, указывая на слабощелочную реакцию. Массовая доля органического вещества в пересчете на сухое вещество составляла не менее 52 %, зольность – не более 48 %. Кроме того, сапропель содержал значительное количество макроэлементов, необходимых для питания растений – азота общего не менее 1,67 %, фосфора общего не менее 0,25 %, калия общего не менее 0,3 % и магния общего не менее 0,6 % в пересчете на абсолютно сухое вещество. Также в составе были обнаружены CaO 6,2 %, Fe_2O_3 0,98 % и SO_3 9,7 % в массовой доле на абсолютно сухое вещество.

Для проведения эксперимента была подготовлена органоминеральная композиция ТДМ из трех перечисленных компонентов. Процесс смешивания осуществлялся до получения однородной массы, обеспечивающей равномерное распределение компонентов.

Размер фракции смеси составлял 0-10 мм, что обеспечивало оптимальную структуру материала, доступность питательных веществ и влаги для растений. При уменьшении размера фракций материала сорбционная емкость по нефтепродуктам возрастает за счет увеличения удельной поверхности. Это обосновывает выбор мелкой фракции – при размерах частиц порядка нескольких миллиметров площадь контакта с нефтезагрязненным грунтом и нефтью максимальна, что ускоряет сорбцию и биодеструкцию углеводородов. Тем самым внесение хорошо структурирующего материала с фракцией 0-10 мм увеличивает суммарную пористость, улучшает инфильтрацию и капиллярный подъем влаги, что критично для восстановления корневых систем и активности почвенной микробиоты на загрязненных участках [28]. Однородная мелкая фракция также обеспечивает равномерное распределение мелиоранта по профилю при механизированном внесении и перемешивании с грунтом (фрезерование, культивация), тогда как более крупные частицы (> 10-20 мм) распределяются по почвенному профилю неоднородно.

В целях предотвращения слипания и образования комков влажность смеси ТДМ перед применением поддерживалась на уровне, не превышающем 15 % (рис.1).

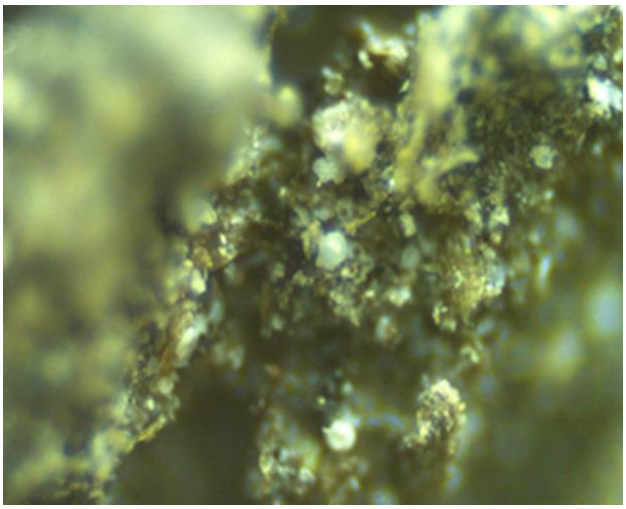


Рис.1. Морфология поверхности ТДМ

Тест-объект. Согласно результатам теоретических исследований, в целях биоремедиации почв от различных поллютантов широко используют биологические растительные ресурсы [8, 13, 29]. Высадка растений способствует развитию в ризосфере нефтеокисляющих микроорганизмов. В настоящем исследовании в качестве тест-объекта принят овес посевной (*Avena sativa)* – однолетняя зерновая культура,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

достигающая 3-6 мм в диаметре стебля и высоты 170 см. Характерные признаки – шероховатые листья длиной до 45 см, имеющие зеленый или сизый оттенок, нередко покрытые восковым налетом. Устойчивость к повышенной кислотности (pH 5-6) делает овес подходящим для освоения торфяных и заболоченных земель. Норма высева – 130-150 кг/га, однако при загрязнении нефтью объем вносимых семян увеличивается до 200 кг/га [1]. Использование овса посевного в качестве тест-объекта регламентируется также нормативными документами (МР 2.1.7.2297-07. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности) [30].

Нефтезагрязненная почва. В связи с тем, что в РФ значительная доля добычи и транспортировки углеводородов приходится на регионы с преобладанием заболоченных и заторфованных почв, в качестве модельной нефтезагрязненной экосистемы в лабораторных опытах был использован верховой торф. При этом торф рассматривался не как аналог конкретного генетического типа заторфованной почвы, а как стандартизованный органогенный субстрат с высоким содержанием органического вещества и развитой пористостью, характерными для болотных экосистем северных регионов. Степень разложения торфа R – 26 %, зольность A – 14 %, влажность W – 45-60 %, содержание гуминовых кислот – 32,5 %, фракционный состав от 0 до 20 мм. Уровень загрязнения нефтью – 63 г/кг, что позволяет сформировать условия, типичные для зон аварийных разливов, провести контролируемые эксперименты и получить достоверные данные о процессах самоочищения и возможностях биоремедиации.

Обсуждение результатов

Результаты экспериментов (табл.3) выявили существенное воздействие ТДМ на процессы детоксикации нефтезагрязненной почвы. Анализ фитотоксичности показал снижение с 1 (контроль) до 0,063 %, что отражает значительное улучшение условий для восстановления растительности. Одновременно с этим было зафиксировано снижение концентрации нефти с 63 (контроль) до 41,5 г/кг, что в свою очередь свидетельствует об активации процессов биодеградации углеводородов под воздействием ТДМ.

Таблица 3

План-матрица экспериментов с результатами откликов

Номер эксперимента	Торф (X_1)	Сапропель (X_2)	Диатомит (X_3)	Y_T, %	Y_{N_d}, г/кг
1	1,098	0,801	0,288	0,237±0,017	46,8±5,9
2	0,720	0,801	0,288	0,147±0,014	48,9±6,3
3	1,098	0,450	0,288	0,063±0,011	48,9±5,4
4	0,720	0,450	0,288	0,192±0,010	47,0±5,9
5	1,098	0,801	0,216	0,138±0,013	52,5±7,0
6	0,720	0,801	0,216	0,128±0,011	45,1±5,6
7	1,098	0,450	0,216	0,074±0,012	44,2±5,4
8	0,720	0,450	0,216	0,134±0,020	41,5±4,9
9	1,330	0,626	0,252	0,015±0,013	43,2±5,2
10	0,560	0,626	0,252	0,178±0,017	49,9±6,5
11	0,909	0,970	0,252	0,220±0,019	43,8±5,3
12	0,909	0,350	0,252	0,154±0,015	42,6±5,1
13	0,909	0,626	0,350	0,306±0,067	47,3±6,0
14	0,909	0,626	0,170	0,250±0,022	48,4±6,2
15	0,909	0,626	0,252	0,177±0,017	50,8±6,6

Учитывая сложность и нелинейность процессов биоремедиации [31-33], была подобрана функционально-факторная степенная модель

$$Y = A_1 x_1^{m1} + A_2 x_2^{m2} + A_3 x_3^{m3} + A_4 x_1^{mm1} x_2^{mm2} x_3^{mm3} + B \pm \sigma,$$

где σ – среднеквадратичная погрешность определения.

Функционально-факторная степенная модель представляется более адекватной, чем простая линейная, и позволяет выявить ключевые факторы, определяющие эффективность мелиоранта.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Взаимодействие трех компонентов может приводить к синергическому или антагонистическому эффекту. Степенные функции в модели позволяют учесть нелинейность влияния каждого компонента, а член взаимодействия $A_4 x_1^{mm1} x_2^{mm2} x_3^{mm3}$ позволяет оценить синергизм или антагонизм между компонентами мелиоранта. Отдельные члены $A_1 x_1^{m1}$ отражают индивидуальный вклад каждого компонента, а свободный член B – базовое значение параметра почвы (Y_{N_d}, г/кг; Y_T, %). После оценки параметров модели ее можно использовать для оптимизации состава мелиоранта с целью достижения наилучших показателей очистки почвы.

Разработанные математические модели предназначены для анализа изменений в показателях фитотоксичности и нефтедеструкции, что позволяет понять процессы, происходящие в исследуемых образцах.

$$Y_T = -0,404x_1^{2,044} - 2,660x_2^{1,088} + 0,00006x_3^{-4,694} + 3,971x_1^{0,329}x_2^{1,052}x_3^{0,221} + 0,330 \pm 0,028; \quad (1)$$

$$Y_{N_d} = 66,1x_1^{1,0} - 5,7x_2^{-1,3} + 5,2x_3^{1,9} - 102,1x_1^{1,1}x_2^{0,9}x_3^{0,7} + 49,7 \pm 2,6. \quad (2)$$

Графические изображения моделей для трех факторов по формулам (1), (2) представлены на рис.2, 3. При построении поверхностей откликов использовалась программа Microsoft Excel.

Фитотоксичность. На основании экспериментальных данных (табл.3) с использованием полученного уравнения регрессии (1) были построены графики (рис.2) по показателю фитотоксичности T загрязненной нефтью почвы при разном соотношении внесенных в нее органоминеральных мелиорантов.

Из рис.2 видно, что основной вклад в снижение фитотоксичности нефтезагрязненной почвы вносит увеличение концентрации торфа в составе композиции органоминеральных мелиорантов при минимальном и среднем содержании диатомита от 0,216 до 0,252 г. Вариант субстрата с минимальной долей торфа и сапропеля, вне зависимости от вариаций концентрации последней в составе, демонстрирует наибольший уровень фитотоксичности, варьирующийся в пределах 0,175-0,225 %. Увеличение концентрации сапропеля в составе композиции органоминеральных мелиорантов незначительно снижает показатель фитотоксичности.

В результате установлено, что экспериментально определенный показатель фитотоксичности загрязненной нефтью почвы при разном соотношении внесенных в нее органоминеральных мелиорантов торфа, сапропеля и диатомита изменяется монотонно под действием четырех факторов – аддитивных (независимых) влияний каждого компонента и мультипликативного (взаимосвязанного) влияния всей смеси.

Изменение показателя T описывается функционально-факторной моделью Y_T, состоящей из суммы исходного показателя (до внесения в почву очищающих компонентов) и четырех степенных функций, отражающих факторное аддитивное и мультипликативное влияния компонентов мелиоранта на снижение фитотоксичности.

Показатель T загрязненной нефтью почвы в связи с изменением пропорционального соотношения компонентности ТДМ в объеме 10 % от ее условно сухой массы уменьшается со среднеквадратичной погрешностью 0,028 % по сумме степенных функций, взаимодействующих аддитивно и мультипликативно с показателями степени соответствующих компонентов 2,04; 1,09; –4,69 и 0,33; 1,05; 0,22, так монотонно вогнуто, что при фиксированных содержаниях торфа 1,1 г, сапропеля 0,45 г, диатомита 0,216 г снижается от исходного значения показателя T = 0,33 % до минимального значения T = 0,066 %.

По полученным результатам разработанных моделей можно отметить, что к концу проведения экспериментальных исследований наиболее низкие значения коэффициента T составляют 0,066 %. При этом оптимальные значения составляющих ТДМ для достижения лучших показателей фитотоксичности составили по торфу (X_1) – 1,094-1,098, сапропелю (X_2) – 0,45-0,463 и диатомиту (X_3) – 0,216-0,252.

Таким образом, оптимизация состава ТДМ путем увеличения содержания торфа и поддержания оптимального уровня содержания диатомита является ключевым фактором для активации процессов биоремедиации нефтезагрязненных почв с точки зрения снижения их фитотоксичности.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

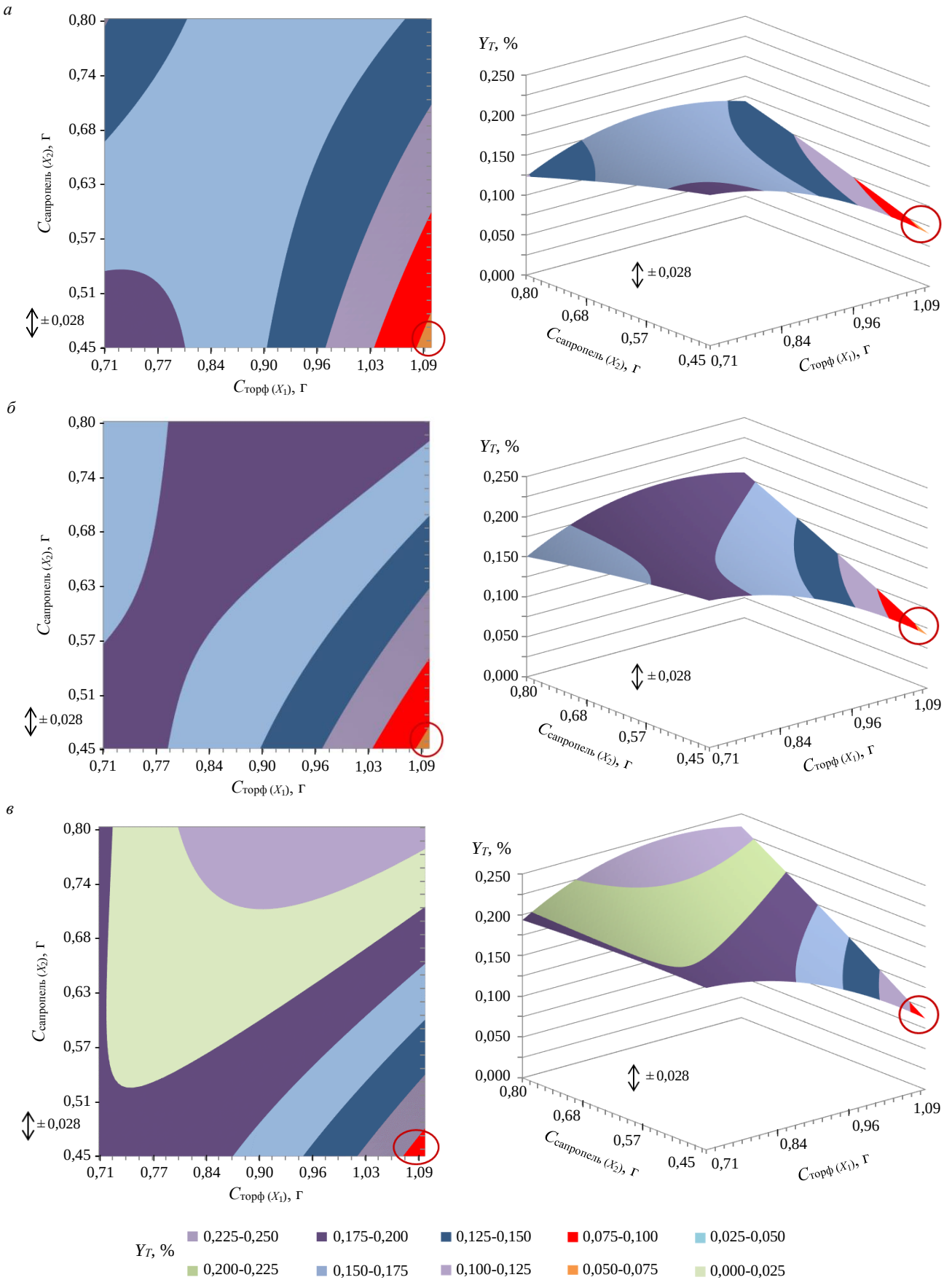


Рис.2. Изменение фитотоксичности нефтезагрязненной наземной экосистемы при разном соотношении компонентов ТДМ и концентрации диатомита в составе 0,216 г (*а*); 0,252 г (*б*); 0,288 г (*в*).
Красным кругом отмечен оптимальный параметр, стрелкой – среднеквадратичная погрешность определения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

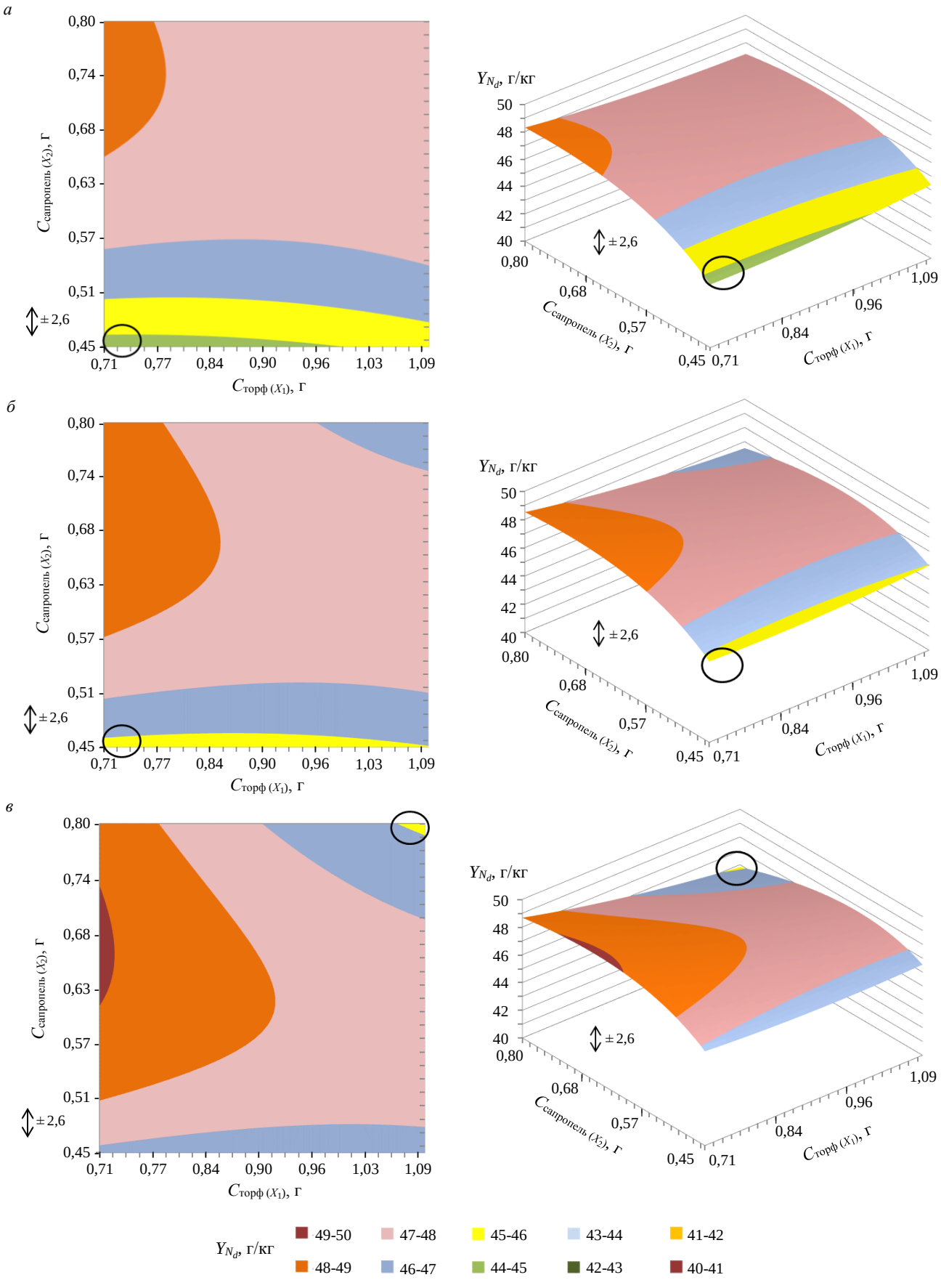


Рис.3. Изменение концентрации нефти в нефтезагрязненной наземной экосистеме при разном соотношении компонентов ТДМ и концентрации диатомита в составе 0,216 г (*а*); 0,252 г (*б*); 0,288 г (*в*).
Черным кругом отмечен оптимальный параметр, стрелкой – среднеквадратичная погрешность определения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Снижение фитотоксичности достигается благодаря синергетическому эффекту торфа и диатомита. Торф связывает и нейтрализует токсичные компоненты нефти, а диатомит улучшает структуру почвы и поддерживает влажность, необходимую для биоремедиации. Сапропель вносит вклад в повышение плодородия, но его эффект менее выражен по сравнению с торфом.

Деструкция нефти. Биоремедиация нефтезагрязненных наземных экосистем базируется на снижении негативного воздействия нефтяных углеводородов на почвенную среду. Ключевым процессом является биологическая деградация сложных соединений, осуществляемая микроорганизмами. Цель состоит в том, чтобы расщепить нефтяные углеводороды до их простейших и нетоксичных компонентов – воды (H_2O) и диоксида углерода (CO_2).

Процесс деградации происходит при активном участии как аэробных, так и анаэробных микроорганизмов, каждый из которых играет свою роль в разложении нефти. Аэробные микроорганизмы используют кислород для окисления углеводородов, в то время как анаэробные, действующие в бескислородной среде, используют для расщепления другие вещества, например сульфаты или нитраты. Взаимодействие этих двух групп микроорганизмов позволяет эффективно разрушать нефтяное загрязнение, возвращая почве ее естественные свойства и создавая условия для восстановления растительного покрова и всей экосистемы. Эффективность биоремедиации определяется скоростью разложения углеводородов и степенью снижения токсичности загрязненной почвы.

Подбор оптимального состава композиции мелиорантов играет важную роль в биоремедиации нефтезагрязненных почв, поскольку позволяет направленно корректировать абиотические факторы, лимитирующие активность углеводородокисляющих микроорганизмов и рост растений, обеспечив необходимыми элементами питания (азот, фосфор, калий), снижать фитотоксичность нефти, нормализовать pH и ОВП почвы, что значительно повышает скорость и эффективность биодеградации нефтяных углеводородов и восстанавливает экологическую функцию загрязненных почв.

Результаты экспериментальных исследований доказывают, что показатель деструкции нефтяного загрязнения почвы N_d при разном пропорциональном соотношении органоминеральных мелиорантов в ТДМ изменяется монотонно под действием четырех факторов – аддитивных (независимых) влияний каждого компонента и мультипликативного (взаимосвязанного) влияния их смеси (рис.3).

Показатель деструкции нефтяного загрязнения почвы описывается функциональной моделью Y_{N_d}, состоящей из суммы исходного показателя (до внесения в почву ТДМ) и четырех степенных функций, отражающих факторное аддитивное и мультипликативное влияние этих компонентов на снижение степени загрязнения. В связи с изменением пропорционального соотношения композиции органоминеральных мелиорантов в объеме 10 % от ее условно сухой массы N_d уменьшается с относительной погрешностью 5,6 % по сумме степенных функций, взаимодействующих аддитивно и мультипликативно с показателями степени соответствующих компонентов 1,86; –1,3; 0,95 и 0,74; 0,9; 1,1, так монотонно вогнуто, что при оптимальных содержаниях торфа 0,720 г, сапропеля 0,450 г и диатомита 0,216 г исходная концентрация нефти 63 г/кг снижается на 34 % до минимального значения 41,5 г/кг в течение месяца. Для сравнения концентрация нефти без применения мелиорантов снизилась на 6 % за аналогичный период.

Интенсификация биодеструкции нефтяных углеводородов наблюдается при сдвиге pH среды из кислой области к значениям, близким к нейтральным (pH_{H_2O} 4,5-6,3), что обусловлено более благоприятными условиями для реализации каталитических функций нефтеразлагающих микроорганизмов. Оптимизация ОВП почвенной среды с 187 до 213 мВ также способствует активации катаболических ферментативных систем, ответственных за метаболизм углеводородных субстратов, за счет усиления аэробных условий и преобладания окислительных реакций [15]. Повышение концентрации сапропеля в составе ТДМ обусловливает наиболее выраженное смещение реакции среды в щелочную область.

Заключение

На основе анализа данных, полученных в ходе эксперимента и обработанных в программе Design-Expert 13, было определено оптимальное соотношение компонентов ТДМ, обеспечивающих достижение заданных целевых показателей по двум ключевым откликам Y_T (показатель фитотоксичности) и Y_{N_d} (показатель нефтедеструкции). Оптимизация проводилась с учетом двух важных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

условий – максимального включения торфа в состав смеси, что связано с экономическими и экологическими преимуществами, и достижения оптимального среднего значения для всех откликов, что гарантирует сбалансированные характеристики получаемой смеси.

Приоритет значения отклика Y_{N_d} при оптимизации указывает на особую важность этой характеристики, так как основной целью применения ТДМ является именно разложение нефтепродуктов, поэтому состав смеси подбирался для обеспечения максимальной эффективности этого процесса.

Использование Design-Expert 13 позволило не только определить оптимальное процентное соотношение компонентов, но и учесть сложные взаимодействия между ними, что повышает надежность и воспроизводимость результатов, а также предоставляет возможность дальнейшего масштабирования и промышленного применения разработанного ТДМ.

Из рис.4, *а* видно, что для достижения оптимального баланса между деструкцией нефти и снижением фитотоксичности необходимо соотношение: торфа 0,778 г, сапропеля 0,479 г и диатомита 0,229 г. Параллельно этому поддерживаются параметры среды – pH около 5,91 и ОВП около 206,51 мВ. Достигаются следующие результаты – остаточное содержание нефти 45,3 г/кг и показатель фитотоксичности 0,176 %. На графике (рис.4, *б*), на котором основной акцент сделан на снижение концентрации нефти, наблюдается изменение соотношения компонентов, обусловливающее уменьшение содержания нефти Y_{N_d} до 42,2 г/кг. Сравнение этих двух вариантов позволяет выбрать состав ТДМ в зависимости от конкретных целей рекультивации.

Таким образом, в результате проведенных исследований обосновано оптимальное соотношение торфяного, сапропелевого и диатомитового сырья, составляющих основу ТДМ. Оптимальные соотношения компонентов ТДМ в граммах / процентах по массе воздушно-сухого вещества представлены в табл.4.

В составе ТДМ преобладает торфяное сырье, что объясняется наличием в торфе метаболически активных углеводородокисляющих микроорганизмов [34, 35], а также пористой структурой торфа, которая способна сорбировать свободную нефть, увеличивая приживаемость растений и микроорганизмов. Сапропель демонстрирует комплексное положительное воздействие на агрохимические свойства нефтезагрязненных почв, сочетая функции мелиоранта и биоактиватора, улучшая агрохимические показатели (C:N:P:K) загрязненной почвы и стабилизируя pH, что особенно актуально в условиях торфяных болот с низким уровнем pH (4,0-4,5). Диатомит имеет важное значение для всхожести семян, улучшения влагоемкости мелиоранта за счет высокого содержания кремния в составе. Его пористая структура увеличивает водоудерживающую способность мелиоранта, обеспечивая равномерное снабжение корней влагой и питательными веществами, что создает благоприятные условия для роста растений. Так, при повышенной концентрации диатомита в составе ТДМ энергия прорастания составила 40 % в течение

Таблица 4

Оптимальное соотношение компонентов ТДМ

Сырье	Минимум	Максимум
Торф	0,720 / 51,5	0,770 / 53,5
Сапропель	0,450 / 31,0	0,470 / 33,5
Диатомит	0,216 / 15,0	0,223 / 15,5

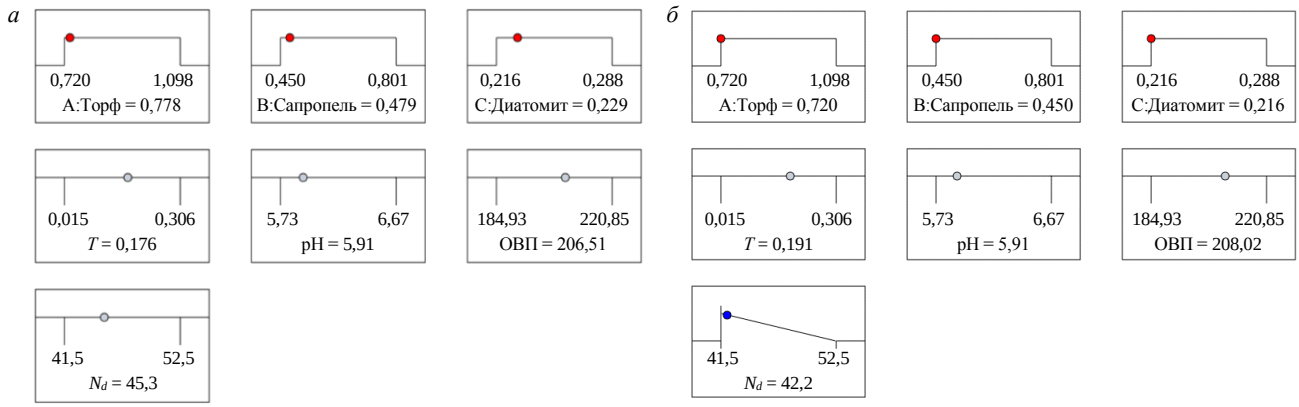


Рис.4. Соотношение компонентов для достижения наилучших соотношений составляющих ТДМ, достигающих целевых уровней отклика Y_T, Y_{N_d}: *а* – при равных условиях значений отклика; *б* – в приоритете Y_{N_d}

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

первой недели эксперимента и 83 % во вторую неделю, тогда как при минимальном содержании диатомита данные показатели не превышали 16,7 и 64 % соответственно. К завершению экспериментального периода лабораторная всхожесть семян в вариантах с высокой концентрацией диатомита достигла 98 %, что на 6 % превысило максимальное значение в вариантах с минимальной дозой диатомита (92 %).

Таким образом, экспериментально определено оптимальное соотношение торфяного, сапропелевого и диатомитового сырья, составляющего основу ТДМ и обеспечивающее максимальную эффективность биоремедиации нефтезагрязненных почв. Установлена зависимость эффективности нефтедеструкции в нефте-загрязненных наземных экосистемах от внесения ТДМ при следующем соотношении органоминеральных мелиорантов: торфа 51,5-53,5 %; сапропеля 31,0-33,5 %; диатомита 15,0-15,5 % по массе воздушно-сухого вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Усманов А.И., Антонинова Н.Ю., Усманова В.А., Горбунов А.В.* Патентный обзор способов рекультивации земель, загрязненных нефтяными углеводородами // Известия Уральского государственного горного университета. 2025. Вып. 1 (77). С. 116-128. DOI: 10.21440/2307-2091-2025-1-116-128

2. *Щемелинина Т.Н., Анчугова Е.М.* Комплексная биотехнология очистки нефтезагрязненной почвы // Поволжский экологический журнал. 2023. № 2. С. 246-256. DOI: 10.35885/1684-7318-2023-2-246-256

3. *Гречищева Н.Ю., Запорожская А.А., Алтанбагана Н.* Оценка самоочищающейся способности нефтезагрязненных почв северных регионов // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». 2023. Т. 66. Вып. 10. С. 114-120. DOI: 10.6060/ivkkt.20236610.6770

4. *Быкова М.В., Пашкевич М.А.* Оценка нефтезагрязненности почв производственных объектов различных почвенно-климатических зон Российской Федерации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. Вып. 1. С. 46-59. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-46-59

5. *Кошельков А.М., Майорова Л.П.* Оценка загрязнения нефтепродуктами почв города Хабаровска // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 65-71. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-12-65-71

6. *Туров Ю.П., Гузняева М.Ю., Лазарев Д.А. и др.* Изучение процессов сорбции и удаления углеводородов нефти из образцов почвы // Почвоведение. 2022. № 6. С. 747-758. DOI: 10.31857/S0032180X22060156

7. *Гайворонский В.Г., Кузина А.А., Колесников С.И. и др.* Способ определения экологически безопасного остаточного содержания нефти и нефтепродуктов в почвах // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 9. С. 987-992. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-9-987-992

8. *Бузмаков С.А., Андреев Д.Н., Назаров А.В. и др.* Разработка экологических критериев для допустимого содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах Пермского края // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 9. С. 62-67. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-9-62-67

9. *Трофимов С.Я., Ковалева Е.И., Аветов Н.А., Толпешта И.И.* Исследования нефтезагрязненных почв и перспективные подходы к их ремедиации // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. Т. 78. № 4. С. 83-93. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-83-93

10. *Федоров Д.В., Серебренникова О.В., Ельчанинова Е.А., Кадычагов П.Б.* Исследование состава и распределения органических соединений в нефтезагрязненных торфяных почвах территории Мамонтовского месторождения (ХМАО-Югра) // Химия твердого топлива. 2024. № 2. С. 50-61. DOI: 10.31857/S0023117724020092

11. *Минникова Т.В., Колесников С.И.* Экологическая оценка применения биочара для ремедиации нефтезагрязненных почв при различном хозяйственном использовании // Записки Горного института. 2025. Т. 271. С. 84-94.

12. *Созина И.Д., Данилов А.С.* Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297-312. DOI: 10.31897/PMI.2023.8

13. *Yulin Zou, Yuanyuan Hu, Sicheng Li et al.* Remediation of crude oil contaminated soil through an integrated biological-chemical-biological strategy // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 919. № 170756. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170756

14. *Vasilyeva G., Mikhedova E., Zinnatshina L. et al.* Use of natural sorbents for accelerated bioremediation of grey forest soil contaminated with crude oil // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 850. № 157952. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157952

15. *Popoola L.T., Yusuff A.S., Adeyi A.A., Omotara O.O.* Bioaugmentation and biostimulation of crude oil contaminated soil: Process parameters influence // South African Journal of Chemical Engineering. 2022. Vol. 39. P. 12-18. DOI: 10.1016/j.sajce.2021.10.003

16. *Totubaeva N., Tokpaeva Z., Izakov J., Moldobaev M.* Bioremediation approaches for oil contaminated soils in extremely high-mountainous conditions // Plant, Soil and Environment. 2023. Vol. 69. Iss. 4. P. 188-193. DOI: 10.17221/433/2022-PSE

17. *Koohkan H., Mortazavi M.S., Golchin A. et al.* The effect of petroleum levels on some soil biological properties under phytoremediation and bioaugmentation // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. Iss. 21. P. 60618-60637. DOI: 10.1007/s11356-023-26730-x

18. *Yijie Dong, Zhiyang Zheng, Lei liao et al.* Natural Degradation Simulation and Phytoremediation of Oil-Contaminated Soil // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 680. № 012115. DOI: 10.1088/1755-1315/680/1/012115

19. *Zhenhua Zhang, Chao Hua, Ayyamperumal R. et al.* The impact of specialization and large-scale operation on the application of pesticides and chemical fertilizers: A spatial panel data analysis in China // Environmental Impact Assessment Review. 2024. Vol. 106. № 107496. DOI: 10.1016/j.eiar.2024.107496

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

20. *Katiyar A., Gedam V.V.* Life cycle assessment of urea production: Environmental impact comparison of two fertilizer technologies in Northern India // Science of The Total Environment. 2025. Vol. 971. № 179034. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179034

21. *Singh S., Singh R., Singh K. et al.* Smart fertilizer technologies: An environmental impact assessment for sustainable agriculture // Smart Agricultural Technology. 2024. Vol. 8. № 100504. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100504

22. *Антонинова Н.Ю., Усманов А.И., Собенин А.В., Горбунов А.А.* Исследование влияния торфо-диатомитового мелиоранта на формирование устойчивого травяного покрова при рекультивации нарушенных земель // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5. С. 131-141. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_131

23. *Sivkov Y.V., Nikiforov A.S.* Study of Oil-Contaminated Soils Phytotoxicity During Bioremediation Activities // Journal of Ecological Engineering. 2021. Vol. 22. Iss. 3. P. 67-72. DOI: 10.12911/22998993/132435

24. *Антонов В.А.* Экспериментальное математическое моделирование в решениях научных и практических задач горного производства // Проблемы недропользования. 2022. № 2 (33). С. 92-102. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.02.092

25. *Усманов А.И., Горбунов А.В.* Изменение свойств техногенных грунтов в процессе рекультивации с использованием торфо-диатомитового мелиоранта // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-2. С. 283-294. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_283

26. *Łach M., Pławecka K., Marczyk J. et al.* Use of diatomite from Polish fields in sustainable development as a sorbent for petroleum substances // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 389. № 136100. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136100

27. *Yiqing Xu, Xianwei Zhang, Xinyu Liu, Gang Wang.* Alterations of physical properties and microstructure of marine diatomite owing to variation of diatom content // Marine Georesources & Geotechnology. 2023. Vol. 41. Iss. 4. P. 376-387. DOI: 10.1080/1064119X.2022.2046664

28. *Краснoперова С.А.* Оценка эффективности сорбентов, применяемых для удаления нефти и нефтепродуктов // Управление техносферой. 2021. Т. 4. Вып. 4. С. 413-423. DOI: 10.34828/UdSU.2021.83.79.007

29. *Юрак В.В., Усманов А.И.* Восстановление нарушенных земель в горных экосистемах // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 4 (58). С. 901-911. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-4-901-911

30. *Бортникова С.Б., Артамонова В.С., Абросимова Н.А. и др.* Результаты экспериментов по фиторемедиации сульфидных отходов хвостохранилищ овсом посевным (*Avena sativa*) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 11. С. 7-23. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3762

31. *Гусейнова М.А., Джалаллы Э.Х.* Численное моделирование биоремедиационного метода очистки почв от нефтяных загрязнений // Технологии нефти и газа. 2024. № 2 (151). С. 35-39. DOI: 10.32935/1815-2600-2024-151-2-35-39

32. *Anekwe I.M.S., Isa Y.M.* Application of biostimulation and bioventing system as bioremediation strategy for the treatment of crude oil contaminated soils // Soil and Water Research. 2024. Vol. 19. Iss. 2. P. 100-110. DOI: 10.17221/66/2023-SWR

33. *Zainab R., Hasnain M., Ali F. et al.* Exploring the bioremediation capability of petroleum-contaminated soils for enhanced environmental sustainability and minimization of ecotoxicological concerns // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. Iss. 48. P. 104933-104957. DOI: 10.1007/s11356-023-29801-1

34. *Манучарова Н.А., Ксенофонтова Н.А., Белов А.А. и др.* Прокариотный компонент нефтезагрязненной торфяной олиготрофной почвы при разном уровне минерального питания // Почвоведение. 2021. № 1. С. 80-89. DOI: 10.31857/S0032180X2101010X

35. *Данилов А.С., Соснина И.Д., Сердюкова Е.А.*Разработка состава и оценка эффективности биопрепарата для очистки нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 3-12.

***Авторы*: Наталья Юрьевна Антонинова**, *канд. техн. наук, заведующий лабораторией* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *natal78@list.ru*, *https://orcid.org/0000-0002-8503-639X*, **Альберт Исмагилович Усманов**, *научный сотрудник* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-3650-0467*, **Владимир Александрович Антонов**, *д-р техн. наук, главный научный сотрудник* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-8777-4791*, **Артем Вячеславович Собенин**, *научный сотрудник* (*Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-5513-5680*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0