

Сапцын Р.В., Еремченко О.З.

Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

УДК 631.4

Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы

Сапцын Р.В., Еремченко О.З.

Пермский государственный национальный исследовательский университет

Аннотация

Загрязнение нефтью отрицательно влияет на способность почв выполнять экологические функции. Проведен эксперимент, моделирующий загрязнение дерново-подзолистой почвы сырой нефтью, с последующей рекультивацией в течение трех месяцев на фоне рыхления, известкования и внесения биопрепаратов. В почве проанализировано содержание остаточных нефтепродуктов, рН, количество подвижных соединений фосфора и калия, каталазная и уреазная активность. Прослежена реакция кресс-салата на состояние почвы по изменению длины и массы надземной части, накоплению белков и редокс-активности. Данные фитотестирования коррелировали с содержанием остаточных нефтепродуктов и, следовательно, могут служить индикаторами процесса разрушения нефтепродуктов в почве. На основе метода математической оптимизации рассчитан интегральный эколого-биологический показатель почвы; наиболее успешное восстановление экологических функций нефтезагрязненной почвы развивалось на фоне рыхления и известкования.

Ключевые слова: ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТАЯ ПОЧВА, НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЕ, РЕМЕДИАЦИЯ, ИНДИКАТОРЫ КАЧЕСТВА ПОЧВЫ, ФИТОТЕСТИРОВАНИЕ

Введение

С конца XX в. исследователи связывают качество почвы со способностью выполнять экологические функции [1], оказывать экосистемные услуги [2]. Почва в отличие от различных питательных субстратов характеризуется способностью к самовоспроизводству и, соответственно, к воспроизводству среды жизнеобеспечения [3].

Сапцын Р.В., Еремченко О.З.

Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

В то же время существуют опасения, что антропогенно измененные почвы не смогут выполнять функции поддержания жизни на Земле [4-6].

Одной из острых глобальных экологических проблем стало загрязнение почв нефтью; разливы нефти на суше влияют на экосистемы, изменяя растительность, животный мир и общее состояние почвы [7, 8]. В разных биоклиматических условиях набор показателей эколого-биологического состояния загрязненных почв может заметно отличаться; при их выборе в первую очередь рекомендуют учитывать параметры, максимально отражающие воспроизводство среды жизнеобеспечения [8, 9].

В Пермском крае после аварийных разливов нефти практикуется удаление нефти и нефтезагрязненной растительности, при этом поверхностный слой почвы разной мощности вывозится на ремедиацию. Основным критерием, по которому оценивают эффективность рекультивационных работ, является остаточное содержание нефтепродуктов в почве, которое не должно превышать региональный норматив допустимого остаточного содержания нефтепродуктов (ДОСНП). Однако в результате технической рекультивации уничтожается плодородный слой почвы, обнажаются подповерхностные почвенные слои, либо на поверхности отсыпают «чужой» минеральный или органоминеральный субстрат разной мощности. Вне контроля остается способность новой «почвы» к воспроизводству среды жизнеобеспечения.

Одним из чувствительных показателей тех или иных изменений, происходящих в почвах под воздействием антропогенных факторов, является ферментативная активность. Активность ферментов эффективно используют как индикаторный показатель при оценке уровня плодородия, влияния эрозии, загрязнения почв пестицидами и нефтью, оценке эффективности рекультивации нефтезагрязненных почв и в других мониторинговых исследованиях [8, 10–12].

При контроле процессов обеззараживания поллютантов и восстановления нефтезагрязненных почв немаловажную роль играет фитотестирование [13, 14].

Последствия нефтезагрязнения и успех биоремедиации зависит от природных условий, влияющих на биodeградацию нефти: типа и характеристик почвы, микробной активности, влажности, температуры, рН, доступности кислорода, питательных веществ, концентрации нефти [7]. В то же время отмечают, что полевые эксперименты по

Сапцын Р.В., Еремченко О.З.

Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы

Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»

биоремедиации достаточно редки, а лабораторные эксперименты не могут воспроизвести изменения, которые происходят в естественных условиях со временем [8].

Цель наших исследований – оценить возможность и целесообразность использования эколого-биологических показателей в целях мониторинга состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы в подзоне южной тайги. Эффективность восстановления экологических функций нефтезагрязненной почвы определили по количеству остаточных нефтепродуктов, некоторым агрохимическим свойствам (рН, подвижные соединения фосфора и калия), ферментативной активности (каталаза и уреазы) и фитотоксичности почвы (по ответной реакции кресс-салата).

Материалы и методы

Для эксперимента использовали пробы из верхней части дерново-подзолистой почвы мощностью около 15 см, которые загрязняли сырой нефтью из расчета 1% и 3% от воздушно-сухого веса почвы. Известкование провели по величине гидролитической кислотности почвы. В почву согласно инструкции производителя внесли биопрепараты: биопрепарат №1 – комплексный препарат, обладающий свойствами регулятора роста, фунгицида, удобрения, рекомендованный для ремедиации нефтезагрязненных почв; биопрепарат №2 – микробиологический препарат, содержащий активные штаммы углеводородокисляющих бактерий.

Схема эксперимента: 1) контроль, 2) нефть 1%, 3) нефть 3%, 4) известь + нефть 1%, 5) известь + нефть 3%, 6) нефть 1% + биопрепарат №1, 7) нефть 3% + биопрепарат №1, 8) нефть 1% + биопрепарат №2, 9) нефть 3% + биопрепарат №2. Варианты опыта заложены в трехкратной повторности.

Образцы почвы весом 5 кг перемешали с известью и нефтью, поместили в сосуды с отверстиями для оттока избыточного количества дождевой воды, полили биопрепаратами. Сосуды с почвой прикопали на открытом воздухе. В течение летних месяцев почву несколько раз рыхлили. В начале сентября из каждого сосуда извлекли половину почвы, вторую половину оставили для последующих наблюдений.

В почвенных пробах в трехкратной повторности определили: $pH_{\text{вод}}$ – потенциометрическим методом; подвижные соединения фосфора и калия – по Кирсанову, активность каталазы и уреазы – методами, описанными Ф.Х. Хазиевым [15].

Фитотестирование почвы проводили по реакции кресс-салата, длину и сырую массу надземной части растений измерили в 25-кратной повторности [16]. Редокс-активность растительных вытяжек из кресс-салата изучали по методу Петта в модификации Прокашева [16] в 6-кратной повторности; содержание водорастворимых белков определили с помощью красителя амидо-черного – в 6-кратной повторности [17].

Значимость различий между вариантами опыта оценили дисперсионным методом по критерию Краскела-Уоллиса (при уровне значимости $P < 0,05$). Зависимости между свойствами почвы и физиолого-биохимическими показателями растений установили методом непараметрического корреляционного анализа (коэффициент Спирмена) при уровне значимости $P < 0,05$.

Результаты исследований

Через три летних месяца в вариантах с 1%-м загрязнением в почве осталось около 0,5% нефтепродуктов, а при 3%-м загрязнении – около 1% нефтепродуктов (рис. 1). Деградацию нефти в почве связывают с активностью почвенных углеводородокисляющих микроорганизмов [18]. Применение биопрепарата №2, содержащего активные штаммы углеводородокисляющих бактерий, способствовало снижению содержания остаточной нефти в варианте с 1%-м загрязнением.

В нефтезагрязненных вариантах опыта отмечали тенденцию к некоторому подкислению почвы (рис. 2), возможно, это обусловлено тем, что при окислении углеводов в почве образуется пальмитиновая, бензойная, салициловая кислоты [19]. На фоне известкования в нефтезагрязненной почве сформировалась нейтральная реакция среды. Применение биопрепаратов при 1%-м и 3%-м нефтезагрязнении способствовало относительно пониженной кислотности почвы, по сравнению с почвой в вариантах без биопрепаратов. Возможно, на фоне биопрепаратов процесс разрушения нефти в почве развивался с образованием других (менее кислых) промежуточных продуктов.

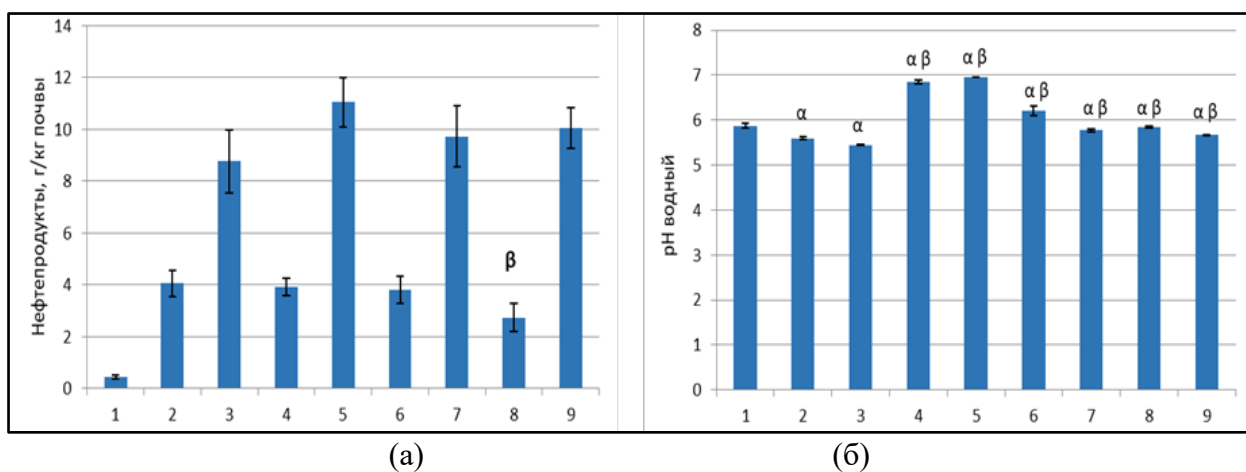


Рис. 1. Содержание остаточных нефтепродуктов (а); реакция почвенной среды (б)
 Примечание: 1) контроль; 2) нефть 1%; 3) нефть 3%; 4) известь + нефть 1%; 5) известь + нефть 3%; 6) нефть 1% + биопрепарат №1; 7) нефть 3% + биопрепарат №1; 8) нефть 1% + биопрепарат №2; 9) нефть 3% + биопрепарат №2; α - значимые различия с контрольным значением; β - значимые различия с соответствующим нефтезагрязненным вариантом опыта.

Все нефтезагрязненные варианты опыта отличались от контроля повышенным количеством подвижных фосфатов в почве, их количество особенно увеличилось в вариантах с 3%-м загрязнением на фоне известкования и применения биопрепарата №1 (рис. 2). Повышение содержания подвижных фосфатов также наблюдали в дерново-карбонатной нефтезагрязненной почве [18] и в темно-серой нефтезагрязненной почве [20]; возможно, подвижные фосфаты появлялись в результате разложения органических соединений нефти.

Одновременно в некоторых нефтезагрязненных вариантах опыта отмечена тенденция к снижению содержания подвижного калия в почве. Отрицательное влияние возрастающих доз нефтепродуктов на содержание обменных форм калия выявлено в черноземе, при нефтезагрязнении 3 г/кг почвы наблюдали наибольшее снижение – в 30% от контроля [21]. Возможно, уменьшение количества питательных форм калия в нефтезагрязненной почве связано с поглощением углекислородными микроорганизмами.

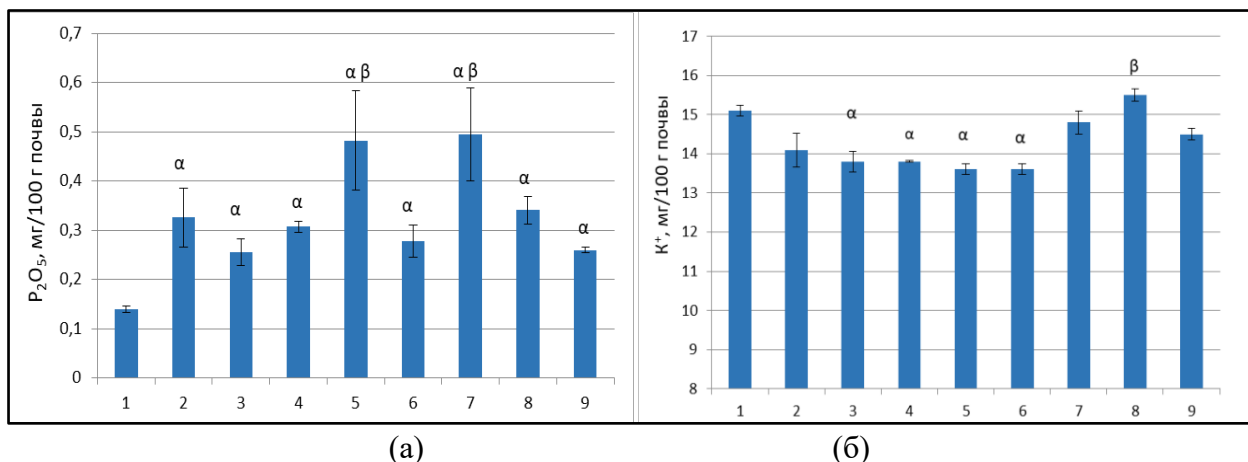


Рис. 2. Содержание подвижных соединений фосфора, мг/100 г (а) и калия, мг/100 г (б)
 Примечание: 1) контроль; 2) нефть 1%; 3) нефть 3%; 4) известь + нефть 1%; 5) известь + нефть 3%; 6) нефть 1% + биопрепарат №1; 7) нефть 3% + биопрепарат №1; 8) нефть 1% + биопрепарат №2; 9) нефть 3% + биопрепарат №2; α - значимые различия с контрольным значением; β - значимые различия с соответствующим нефтезагрязненным вариантом опыта.

Активность каталазы считается одним из критериев эколого-биологического состояния почв, используемых при оценке не только загрязненных, но и любых антропогенно-преобразованных почв [22-24]. В подзолистой почве активность каталазы заметно подавлялась при загрязнении нефтью [8]. В нашем эксперименте в вариантах опыта с 1%-м и 3%-м нефтезагрязнением по активности каталазы в почве, в том числе, известкованной, не установлено значимых различий с контролем (рис. 3). Однако нефтезагрязненные варианты опыта с применением биопрепаратов характеризовались пониженной каталазной активностью почвы, по сравнению с соответствующими вариантами без применения биопрепаратов. По С.И. Колесникову с соавторами [7] степень снижения каталазной активности зависит от содержания в почве нефти и генетических свойств почвы, определяющих ее устойчивость к загрязнению. Отмеченное снижение каталазной активности почвы в вариантах с биопрепаратами, вероятно, связано с тем, что индукция ферментов микробиотой может блокироваться появлением токсичных продуктов полурасложения нефти [19, 25].

По активности уреазы в почве большинство нефтезагрязненных вариантов опыта не имели значимых различий с контролем (рис. 3). В подзолистой почве синтез уреазы после нефтезагрязнения относительно быстро стабилизировался [8]. Однако, в двух вариантах опыта с 3%-м нефтезагрязнением активность уреазы была заметно

повышенной, именно в этих вариантах опыта наблюдали накопление подвижных фосфатов в почве.

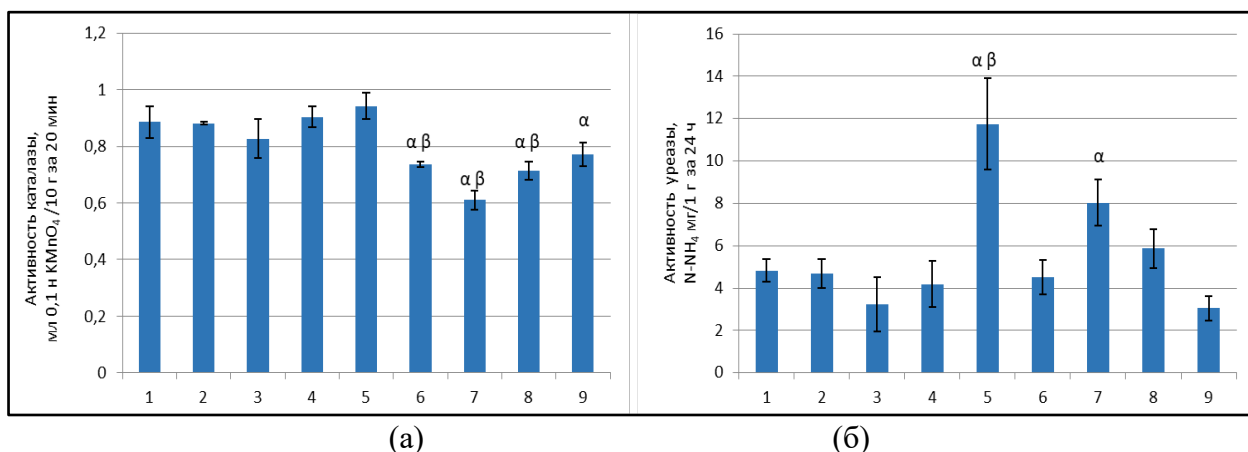


Рис. 3. Каталазная (а) и уреазная (б) активность почвы

Примечание: 1) контроль; 2) нефть 1%; 3) нефть 3%; 4) известь + нефть 1%; 5) известь + нефть 3%; 6) нефть 1% + биопрепарат №1; 7) нефть 3% + биопрепарат №1; 8) нефть 1% + биопрепарат №2; 9) нефть 3% + биопрепарат №2; α - значимые различия с контрольным значением; β - значимые различия с соответствующим нефтезагрязненным вариантом опыта.

При выборе тест-культуры мы исходили из того, что в работах ряда авторов тестирование кресс-салатом показало свою информативность при анализе загрязнений, как отдельными поллютантами, так и при их комплексном воздействии [26-29]. Остаточные нефтепродукты в почве отрицательно повлияли на морфометрические показатели кресс-салата. Длина надземной части тест-культуры на нефтезагрязненных почвах была заметно ниже, чем в контрольном варианте: в варианте с 1%-м загрязнением – на 20%, в варианте с 3%-м загрязнением – на 37% (рис. 4). Известкование почвы положительно повлияло на состояние растений, в варианте с 1%-м нефтезагрязнением длина растений не отличалась от контрольных значений. Положительное воздействие биопрепарата №1 на длину растений прослежено в варианте с 1%-м загрязнением. На фоне применения микробиологического биопрепарата №2 длина растений увеличилась на 10%, по сравнению с растениями в загрязненных вариантах опыта.

Масса надземной части кресс-салата относительно повышена при выращивании на известкованной нефтезагрязненной почве (рис. 4). Положительное влияние биопрепаратов

было небольшим, прибавки массы кресс-салата не всегда были значимыми относительно растений на нефтезагрязненной почве без применения биопрепаратов.

В растениях на нефтезагрязненной почве содержание белка было ниже, чем в контрольных растениях, особенно в вариантах с 3%-м нефтезагрязнением (рис. 4). Нефтяное загрязнение почвы также сопровождалось снижением содержания белка в растениях *Medicago sativa* L. [30]. Ранее в лабораторном эксперименте с загрязнением дерново-подзолистой почвы мы наблюдали снижение содержания белков в кресс-салате пропорционально увеличению дозы нефти [31]. На фоне известкования нефтезагрязненной почвы наблюдали накопление белков в кресс-салате, по сравнению с растениями на немелиорированной почве с соответствующим уровнем загрязнения.

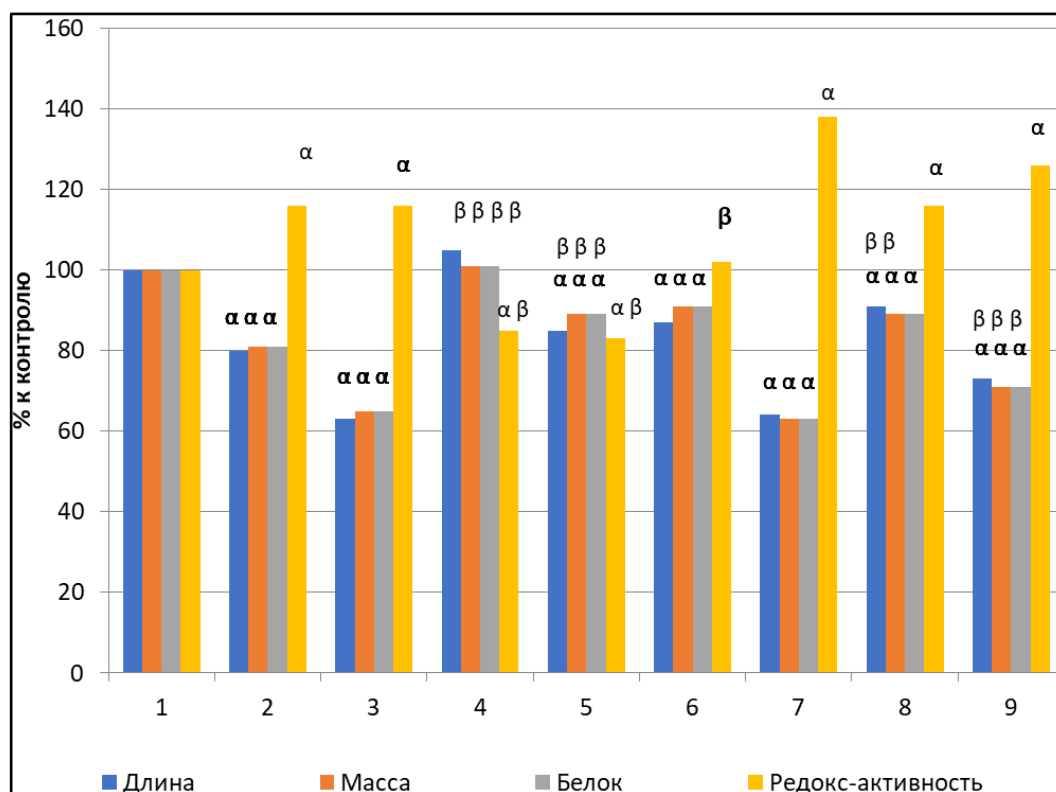


Рис. 4. Результаты фитотестирования почвы

Примечание: 1) контроль; 2) нефть 1%; 3) нефть 3%; 4) известь + нефть 1%; 5) известь + нефть 3%; 6) нефть 1% + биопрепарат №1; 7) нефть 3% + биопрепарат №1; 8) нефть 1% + биопрепарат №2; 9) нефть 3% + биопрепарат №2; α - значимые различия с контрольным значением; β - значимые различия с соответствующим нефтезагрязненным вариантом опыта.

На фоне нефтезагрязнения повышена редокс-активность растительных экстрактов из кресс-салата (рис. 4). Эти данные соответствуют сведениям по аккумуляции в растениях при нефтяном стрессе веществ, характеризующихся восстановительной активностью (антоцианы, рибофлавин, аскорбиновая кислота и др.) [19, 32–35].

В вариантах с известкованной почвой не отмечали усиления редокс-активности в листьях кресс-салата (рис. 4). Вероятно, благодаря обеспеченности ионами Ca^{2+} растения испытывали меньший стресс, что подтверждают и данные по накоплению белков. На многих растительных объектах показано повышение устойчивости растительных тканей и интактных растений к неблагоприятным факторам под действием экзогенного кальция [34].

Корреляционный анализ показал, что содержание остаточных нефтепродуктов и кислотность почвы отрицательно влияют на длину и массу надземной части тест-культуры (табл. 1). Сильная обратная зависимость выявлена между количеством остаточных нефтепродуктов в почве и накоплением белков в растениях. Редокс-активность обратно пропорциональна длине и массе растений; этот показатель стресса возрастал с усилением кислотности почвы.

Таблица 1. Корреляционная зависимость между показателями эколого-биологического состояния нефтезагрязненной почвы

Показатели	Длина	Масса	Белок	РА	НП	pH	АК	АУ	P ₂ O ₅	К
Длина										
Масса	0,94									
Белок	0,32	0,28								
РА	-0,70	-0,81	0,04							
НП	-0,71	-0,65	-0,78	0,37						
pH	0,56	0,65	-0,30	-0,70	0,07					
АК	0,36	0,53	-0,20	-0,73	0,03	0,47				
АУ	0,21	0,02	0,29	-0,23	-0,12	0,13	0			
P ₂ O ₅	0,04	-0,25	-0,19	0,10	0,30	0,12	-0,22	0,70		
К	0,17	0,09	0,25	0,40	-0,34	0,38	-0,41	0,18	0,02	

Примечание: РА – редокс-активность, НП – нефтепродукты, АК – активность каталазы, АУ – активность уреазы. Полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции Спирмена при $P < 0,05$.

Отмеченная в эксперименте связь редокс-активности кресс-салата и почвенной кислотности соотносится с ранее выявленной зависимостью этого показателя от

кислотности почв Пермского края [16]. Между редокс-активностью кресс-салата и каталазной активностью почвы установлена обратная корреляционная зависимость, по-видимому, они указывают, насколько почва благоприятна для растений и микроорганизмов. Активность уреазы возрастала с увеличением содержания подвижных соединений фосфора в почве, улучшающих питание и размножение микроорганизмов.

Таким образом, в полевом эксперименте с нефтезагрязнением дерново-подзолистой почвы после применения некоторых приемов ремедиации (рыхление, внесение биопрепаратов) нами получен ряд данных, характеризующих способность почвы к воспроизводству среды жизнеобеспечения. Для оценки эффективности восстановления нефтезагрязненной почвы использовали метод математической оптимизации. Из выборки полученных данных ($x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$) выбран экстремум – минимальное (x_{\min}) или максимальное (x_{\max}) значение. Для содержания остаточных нефтепродуктов в качестве оптимального был выбран уровень их содержания в незагрязненной почве. Для показателей длины, массы тест-культуры, содержания в ней белков, величины рН, подвижных фосфатов и калия использованы максимальные значения. В качестве экстремума для редокс-активности был взят минимальный показатель, полученный в эксперименте. Относительно экстремума рассчитали нормированные значения показателей: $x_k = x_{\min} / x_n$, или $x_k = x_n / x_{\max}$. Путем сложения нормированного значения показателей получили критерий оптимизации в каждом варианте опыта.

Расчет интегрального эколого-биологического показателя почвы провели следующим образом: значение критерия оптимизации в контрольном варианте опыта приняли за 100%, относительно этого рассчитали интегральные показатели в остальных вариантах опыта. По величине интегрального эколого-биологического показателя почвы варианты с 1%-м нефтезагрязнением выстроились в следующую последовательность: контроль / **100%** > известь + нефть 1% / **91%** > известь + нефть 1% + биопрепарат №2 / **88%** > нефть 1% / **86%** = нефть 1% + биопрепарат №1 / **86%**. Интегральные эколого-биологические показатели почвы в вариантах опыта с 3%-м нефтезагрязнением образовали такую последовательность: контроль / **100%** > известь + нефть 3% / **99%** > нефть 3% + биопрепарат №1 / **81%** > нефть 3% / **78%** > нефть 3% + биопрепарат №2 / **72%**.

Выводы

1. В результате разложения нефтепродуктов в дерново-подзолистой почве изменились реакция почвенной среды, содержание подвижных соединений фосфора и калия, активность каталазы и уреазы. В нефтезагрязненной известкованной почве наблюдали наиболее благоприятную рН, повышенную обеспеченность фосфатами и усиленную активность ферментов.

2. Индикаторами восстановления нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы являются результаты фитотестирования; длина и масса надземной части кресс-салата, а также накопление в нем белков коррелировали с содержанием остаточных нефтепродуктов в почве.

3. Редокс-активность растительных экстрактов из кресс-салата увеличивалась в нефтезагрязненных вариантах опыта. Установлена прямая зависимость между редокс-активностью и кислотностью почвы, а также обратная связь между редокс-активностью и каталазной активностью почвы.

4. В соответствии с показателем эколого-биологического состояния наиболее успешное восстановление экологических функций нефтезагрязненной почвы развивалось на фоне рыхления и известкования. Рекомендуем использовать показатель эколого-биологического состояния при комплексной оценке эффективности ремедиации нефтезагрязненной почвы.

Список использованных источников:

1. Nikitin E.D., Kochergin A.N., Nikitina O.G., Ivanov O.P., Sabodina E.P., Vorontsova E.M., Skvortsova E.B. Development of the concept of the ecological functions of the soil cover and other geospheres // Eurasian Soil Science. – 2010. – Т. 43. – N 7. – P. 721-727.

2. Adhikari K., Hartemink A.E. Linking soils to ecosystem services—A global review // Geoderma. – 2016. – N 262. – P. 101-111.

3. Кирюшин В.И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель // Почвоведение. – 2020. – № 7. – С. 871-879.

4. Haygarth P.M., Ritz K. The future of soils and land use in the UK: soil systems for the provision of land-based ecosystem services // Land use policy. – 2009. – N 26. – P.187-197.

5. Керженцев А.С. Механизм функционирования почвы и устойчивость экосистем // Вестник Российской академии наук. – Т. 80. – №8. – 2010. – С. 704-709.

6. Ковалев И.В., Ковалева Н.О. Экологические функции почв и вызовы современности // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2020. – Т. 16. – №2. – С. 4-16.
7. Колесников С.И., Азнаурьян Д.К., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Устойчивость биологических свойств почв юга России к нефтяному загрязнению // Экология. – 2010. – № 5. – С. 357-364.
8. Polyak Y.M., Vakina L.G., Chugunova M.V., Mayachkina N.V., Gerasimov A.O., Bure V.M. Effect of remediation strategies on biological activity of oil-contaminated soil-A field study // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2018. – N 126. – P. 57-68.
9. Лаптева Е.М., Виноградова Ю.А., Кудрин А.А. Биологическая активность почв: методы оценки и проблемы интерпретации результатов // Вестник института биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. – 2011. – №12. – С. 37-40.
10. Шарاپова И.Э., Гарабаджиу А.В. Оценка эффективности способов биоремедиации почв от нефтяных загрязнений // Инженерная экология. – 2015. – № 2. – С. 32-42.
11. Silva-Castro G.A., Uad I., Rodríguez-Calvo A., González-López J., Calvo C. Response of autochthonous microbiota of diesel polluted soils to land-farming treatments // Environmental Research. – 2015. – N 37. – P. 49-58.
12. Хазиев Ф.Х. Экологические связи ферментативной активности почв // Экобиотех. 2018. – Т. 1. – № 2. – С. 80-92.
13. Кольцова Т.Г., Сунгатуллина Л.М., Григорьян Б.Р., Петров А.М. Оценка фитотоксичности черноземных почв в условиях нефтяного загрязнения // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – №17(15). – С. 261-267.
14. Тишин А.С. Фитотестирование почв, загрязненных нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 12-2(102). – С. 78-83.
15. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. – М.: Наука, 2005. – 252 с.
16. Патент РФ № 2620555. Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов / О.З. Еремченко, Н.В. Митракова. По заявке № 2016113050. Оpubл. 26.05. 2017.
17. Кусакина М.Г., Суворов В.И., Чудинова Л.А. Большой практикум «Биохимия»: лаб. работы. – Пермь, 2012. – 148 с.
18. Баландина А.В., Еремченко О.З. Микробная ремедиация нефтезагрязненных агродерново-карбонатных почв и техногенных поверхностных образований в подзоне южной тайги. – Пермь, 2016. – 100. с.
19. Киреева Н.А., Новоселова Е.И., Хазиев Ф.Х. Активность карбогидраз в нефтезагрязненных почвах // Почвоведение. – 1998. – № 12. – С. 1444-1448.
20. Швец А.А. Фиторемедиация нефтезагрязненных нефтью почв: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.03. – Краснодар, 2009. – 129 с.

21. Арзамазова А.В., Кинжаев Р.Р., Гальцова А.Д., Хрептугова А.Н. Влияние нефтезагрязнения на агрохимические свойства чернозема типичного и продуктивность яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) // Проблемы агрохимии и экологии. – 2017. – №4. С .21-25.
22. Garcia-Gil J.C., Plaza C., Soler-Rovira P., Polo A. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass // Soil Biology & Biochemistry. – 2000. – N 32. – P. 1907-1913.
23. Shi Z.J., Lu Y., Xu Z.G., Fu S.L. Enzyme activities of urban soils under different land use in the Shenzhen city, China // Plant Soil Environ. – 2008. – N 54(8). – P. 341-346.
24. Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A. Microbial activities and trace element contents in an urban soil // Environ. Monit. – 2009. – N 165. – P. 193-203.
25. Bouchez M., Blanchet D., Vandecasteele J.P. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by pure strains and by defined strain associations: inhibition phenomena and cometabolism // Applied microbiology and biotechnology. – 1995. – Vol. 43. P. 156-64.
26. Shunelko E.V., Fedorova A.I. Environmental assessment of urban soils and identification of the level of toxicity of heavy metals by biotesting method // Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology. – N 4. – P. 77-83.
27. Czerniawska-Kusza I., Ciesielczuk T., Kusza G., Cichon A. Comparison of the Phytotoxkit microbiotest and chemical variables for toxicity evaluation of sediments // Environmental Toxicology. – N 21 (4). – P. 367-372.
28. Sujetovienė G., Griauslytė L. Toxicity assessment of roadside soil using wild oat (*Avena sativa* L.) and cress (*Lepidium sativum* L.) morphometric and biochemical parameters // Environmental Research, Engineering and Management. – 2008. – N 4(46). – P. 29-35.
29. Lisovitskaya O.V., Terekhova V.A. Phytotesting: basic approaches, problems of the laboratory method and modern solutions // Reports on environmental soil science. – N 1(13). – P. 1-18.
30. Сотникова Ю.М., Григориади А.С., Фархутдинов Р.Г. Изменение содержания белка у растений люцерны посевной *Medicago sativa* L. под влиянием загрязнения почвы нефтью и рекультивации с применением препарата «Елена» // Биомика. – 2020. – Т.12(3). – С. 324-328.
31. Сапцын Р.В., Чудинова Н.В., Еремченко О.З., Баландина А.В. Влияние нефтезагрязнения на активность редокс-процессов, содержание белков и развитие кресс-салата [Электрон. ресурс] // Сб. статей XXIII Международной конференции ученых – биологов «Симбиоз – Россия 2022». – Пермь, 2022. – Режим доступа: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/sborniki/Simbioz-Russia-2022.pdf>.
32. Чупахина Г.Н., Масленников П.В. Адаптация растений к нефтяному стрессу // Экология. – 2004. – № 5. – С. 330-335.

Сапцын Р.В., Еремченко О.З.

Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы

**Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»**

33. Осипова Е.С., Петухова Г.А., Перекупка А.Г. Активация биохимических механизмов защиты растений при действии нефтяного загрязнения и парааминобензойной кислоты // Вестник Тюменского государственного университета. – 2013. – № 6. – С. 41-47.

34. Булуктаев А.А., Сангаджиева Л.Х., Даваева Ц.Д. Влияние нефтедобывающего комплекса на свойства почв в зоне заповедного режима // Известия Саратовского университета. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2015. – №4. – С. 109-114.

35. Колупаев Ю.Е., Карпец Ю.В. Формирование адаптивных реакций растений на действие абиотических стрессоров. – Киев: Основа, 2010. – 352 с.

Цитирование:

Сапцын Р.В., Еремченко О.З. Индикаторы эколого-биологического состояния нефтезагрязненной дерново-подзолистой почвы [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 4. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/4/st_410.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/202134410>.