

ВЛИЯНИЕ БАЙКАЛ ЭМ-1 НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ, МАЗУТОМ И БЕНЗИНОМ*

А.С. Русева, аспирант, **Т.В. Минникова**, кандидат биологических наук, **С.И. Колесников**, доктор сельскохозяйственных наук, **С.Ю. Ревина**, студент, **Н.А. Евстегнеева**, аспирант, **Д.А. Труфанов**, аспирант

*Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского, Южный федеральный университет
344090, Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 194/1
E-mail: loko261008@yandex.ru*

Загрязнение черноземов нефтью и нефтепродуктами – одно из наиболее серьезных и тяжело устраняемых антропогенных нарушений, которое приводит к выведению больших участков земли из сельскохозяйственного оборота. Исследования проводили с целью изучения влияния микробиологического препарата Байкал ЭМ-1 на состояние чернозема обыкновенного, загрязненного нефтью, мазутом и бензином. Загрязнение моделировали в лабораторных условиях путем внесения каждого загрязнителя в количестве 5 % от массы почвы. Для ремедиации почвы использовали микробиологический препарат Байкал ЭМ-1 трех доз: рекомендуемая (D), в 2 раза меньше рекомендуемой (D_{0,5}) и в 2 раза больше рекомендуемой (D₂). Определяли физико-химические (реакция среды, содержание легкорастворимых солей, окислительно-восстановительный потенциал, гидрофобность) и биологические (фитотоксичность, активность ферментов каталазы и дегидрогеназ, общая численность бактерий) показатели почвы до и после внесения ремедиантов. Загрязнение нефтью и нефтепродуктами не приводит к повышению pH почв до значений, превышающих нейтральные, не оказывает воздействия на содержание легкорастворимых солей, но сопровождается сменой окислительных условий на восстановительные и увеличением гидрофобности почв. Стимуляция активности дегидрогеназ после применения Байкал ЭМ-1 отмечена только при загрязнении черноземов бензином. Препарат способствует росту числа бактерий в загрязненных мазутом и бензином почвах, а также в дозе D₂ при загрязнении нефтью. Наиболее токсичным загрязнителем оказался мазут, а наименее – бензин. Согласно показателю ИИБС, применение Байкал ЭМ-1 в наибольшей степени восстанавливает экологическое состояние при загрязнении нефтью в дозе D (на 12 % относительно контроля), при загрязнении мазутом и бензином – в дозе D_{0,5} (соответственно на 39 и 11 % относительно контроля). Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования Байкал ЭМ-1 в естественных условиях при загрязнении почв нефтью и нефтепродуктами.

INFLUENCE OF BAIKAL EM-1 ON THE ECOLOGICAL STATE OF HAPLIC CHERNOZEM AFTER OIL, FUEL AND GASOLINE POLLUTION*

Ruseva A.S., PhD student, **Minnikova T.V.**, PhD of Biological Sciences, **Kolesnikov S.I.**, Doctor of Agricultural Sciences, **Revina S.Yu.**, student, **Evstegneeva N.A.**, PhD student, **Trufanov D.A.**, PhD student

*Academy of Biology and Biotechnology. DI. Ivanovsky, Southern Federal University,
344090, Rostov-na-Donu, prosp. Stachki, 194/1
E-mail: loko261008@yandex.ru*

Pollution of haplic chernozem with oil, fuel oil and gasoline is one of the most serious and difficult to eliminate anthropogenic disturbances, which leads to the withdrawal of large plots of land from agricultural use. The research was carried out to study the effect of the microbiological preparation Baikal EM-1 on the state of haplic chernozem, contaminated with oil, fuel oil and gasoline. Pollution was modeled under laboratory conditions by introducing PHC products in an amount of 5% of the soil mass. For soil remediation, the Baikal EM-1 microbiological preparation was used at doses: recommended (D), two times less than recommended (D_{0,5}), and 2 times more than recommended (D₂). Physicochemical (pH, content of easily soluble salts, redox potential, hydrophobicity) and biological (phytotoxicity, activity of catalase and dehydrogenases enzymes, total number of bacteria) soil parameters were determined before and after the introduction of ameliorants. Pollution with PHC products does not lead to an increase in soil pH to values exceeding neutral, does not affect the content of easily soluble salts, but is accompanied by a change in oxidizing conditions to reducing ones and an increase in soil hydrophobicity. Stimulation of the activity of dehydrogenases after the application of Baikal EM-1 was noted only when chernozems were contaminated with gasoline. The drug contributes to the growth of the number of bacteria in soils contaminated with fuel oil and gasoline, as well as in a dose of D₂ when contaminated with PHC. Fuel oil was the most toxic pollutant, and gasoline was the least. According to the IIBS indicator, the use of Baikal EM-1 restores the ecological state to the greatest extent when contaminated with oil at the recommended dose (D) than when contaminated with fuel oil and gasoline at a dose of D_{0,5}, the thought is not clear, state it in more detail. The results obtained indicate the possibility of using Baikal EM-1 in natural conditions when soils are contaminated with oil, fuel oil and gasoline.

Ключевые слова: загрязнение почв, биоремедиация, биоаугментация, чернозем обыкновенный, микробиологические показатели, ферментативная активность.

Key words: soil pollution, bioremediation, bioaugmentation, haplic chernozem, microbiological parameters, enzymatic activity.

По данным Международного агентства (Statistical Review of World Energy) в 2021 г. добыча нефти в мире составила 4165,1 млн т, из которых 524,4 млн т пришлось на Россию [1]. При этом в нашей стране каждый год фиксируют более 3 тыс. случаев разлива нефти и

ее производных. Масштабы загрязнения окружающей среды углеводородами требуют согласованных усилий по разработке методов эффективного управления. Это необходимо для создания баланса между использованием ресурсов и экологической устойчивостью среды

*исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента МК-175.2022.5 и проекта Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории "Агробиотехнологии для повышения плодородия почв и качества сельскохозяйственной продукции" в рамках программы развития межрегионального научно-образовательного центра Юга России (ЛабНОЦ-21-01АБ).

[2]. Так, в 2017 г. в Южном федеральном округе объем разлитой нефти составил 8775 м³ [3]. Согласно стратегии научного развития региона необходимо осуществить переход к экологически безопасной и ресурсосберегающей энергетике, с повышением эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, с оценкой и рациональным использованием новых источников нефтяных углеводородов, способов транспортировки и сохранения энергии при их переработке.

Естественное восстановление загрязненных нефтью и нефтепродуктами почв достаточно длительный процесс. В современных условиях восстановление почвенных свойств после таких загрязнителей возможно с использованием химических, физических и биологических способов ремедиации [4, 5]. Химические способы, заключающиеся в экстракции загрязняющих веществ растворителями или в их окислении приводят к изменению агрохимических характеристик почвы и грунтовых вод. Физико-химические методы (удаление и захоронение нефти, нефтепродуктов и загрязненной почвы, термическая обработка, промывка водой под давлением и др.) подходят для восстановления относительно небольших участков, не обеспечивают полного удаления нефти и нефтепродуктов из почвы, а также достаточно дорого стоят. Поэтому к основным действующим методам восстановления экологического состояния нефтезагрязненных почв относят биологические [6, 7, 8].

На сегодняшний день большую популярность в различных сферах жизнедеятельности человека, в том числе при восстановлении загрязненных почв, приобрело использование технологий эффективных микроорганизмов (ЭМ-технологий). В их основу заложено использование особых биопрепаратов, которые содержат сбалансированный комплекс «полезных» микроорганизмов различных физиологических групп с широчайшим диапазоном действия [9].

Один из наиболее известных препаратов – Байкал ЭМ-1. Он содержит комплекс микроорганизмов и предназначен для повышения плодородия почвы и почвенных смесей. В состав биопрепарата входят молочнокислые, азотфиксирующие, фотосинтезирующие бактерии, актиномицеты и сахаромицеты, а также культуральная

жидкость (вода, меласса, соли гуминовых кислот, соли минеральные). Рядом исследований доказана его эффективность при ремедиации загрязненных нефтью и нефтепродуктами почв [10, 11].

Для мониторинга восстановления экологического состояния нефтезагрязненных почв после внесения ремедиантов целесообразно использовать биологические показатели для оценки экологического состояния почв [3, 7, 12].

Цель исследований – оценить влияние Байкал ЭМ-1 на состояние чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, мазутом и бензином.

Методика. Объект исследования – чернозем обыкновенный карбонатный, отобранный в Ботаническом саду Южного федерального университета из верхнего слоя (A_{max} 0...10 см). Для моделирования загрязнения использовали нефть, предоставленную Новошахтинским НПЗ (Новошахтинск), мазут компании «Неклиновскнефтепродукт» (Неклиновск), бензин марки АИ-95. Нефть характеризовалась следующими свойствами: плотность – 0,818 г/м³, массовая доля серы – 0,43 %, механических примесей – 0,0028 %, воды – 0,03 %, концентрация хлористых солей – 40,1 мг/дм³. Плотность мазута составляла 923,4 кг/м³, массовая доля серы – 1,71 %, механических примесей – 0,035 %, воды – 0,09 %, условная вязкость – 3,8 ВУ. Плотность бензина при 20 °С была равна 739,1 мг/см³, массовая доля серы – менее 3 %, кислорода – 0,15 %.

Микробиологический препарат Байкал ЭМ-1 вносили в почву в виде раствора в трех дозах: рекомендуемой производителем для предпосевной либо послепосевной обработки почвы (0,5 %-ный раствор препарата) – Д, в 2 раза меньшей рекомендуемой – Д_{0,5} и в 2 раза больше рекомендуемой – Д₂. После этого добавляли загрязнитель. Контролем выступали почвы с используемым в каждой части опыта загрязнителем: нефтью, мазутом или бензином, но без препарата. Также на образцах без загрязнителей была проведена оценка токсичности самого Байкал ЭМ-1. В этой части опыта контролем служила почва без препарата. После добавления нефти, мазута или бензина и изучаемого препарата почву инкубировали в лабораторных сосудах при оптимальной темпе-

Табл. 1. Методы определения биологических и физико-химических показателей

Показатель	Метод	Единица измерения
физико-химические		
Реакция почвенной среды (рН водной вытяжки)	потенциометрический на анализаторе HANNA HI 2211	–
Содержание легкорастворимых солей	кондуктометрический на анализаторе HANNA inst. Total Dissolved HI 9034	мг/кг
Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП)	потенциометрический на ORP by HANNA HI 98120	мВ
Гидрофобность	тест на время проникновения водной капли	секунд
биологические		
Активность каталазы	газометрический по А. Ш. Галстяну (1978)	мл О ₂ в 1 мин/1 г
Активность дегидрогеназ	колориметрический по А. Ш. Галстяну (1962)	мг ТФФ/10 г/24 ч
Общая численность бактерий	люминесцентной микроскопии в падающем свете по Д.Г. Звягинцеву и П.А. Кожевину (1974)	млрд/г
Длина побегов и корней	по изменению показателей прорастания семян редиса по М.А. Бабьевой, Н.К. Зеновой (1989)	мм
Всхожесть	по изменению интенсивности начального роста семян по М.А. Бабьевой, Н.К. Зеновой (1989)	шт

Табл. 2. Классификация по степени почвенной гидрофобности

Класс	Время, с	Степень гидрофобности почвы
0	<5	негидрофобная
1	5–60	слабогидрофобная
2	60–600	сильногидрофобная
3	600–3600	очень сильногидрофобная
4	>3600	чрезвычайно сильногидрофобная

ратуре и увлажнении (60 % от полевой влагоемкости) в течение 30 суток.

Для моделирования процесса загрязнения почву после отбора просушивали, перебирали от корней растений, затем просеивали через сито с диаметром ячеек 3,2 мм. Подготовленные образцы по 200 г помещали в вегетационные сосуды, увлажняли и загрязняли нефтью, бензином и мазутом. Так как ПДК нефти и нефтепродуктов для почв не разработаны, с целью выражения концентрации использовали их процентное содержание. Нефть и нефтепродукты вносили в концентрации 5 % от массы почвы. Поскольку известно, что обычно в районах добычи, переработки и транспортировки нефти, получения и использования нефтепродуктов возникает нефтезагрязнение до 10 % от массы почвы и более [12, 13].

Экологическое состояния почв оценивали по следующим физико-химическим показателям: рН, содержание легкорастворимых солей, окислительно-восстановительный потенциал почвы, гидрофобность (табл. 1) [14].

При определении степени гидрофобности почвы использовали существующую классификацию (табл. 2) [15]. При определении фитотоксических свойств почв использовали редис садовый (*Raphanus sativus L. var. sativus*) сорта Жара [16, 17, 18].

На основании информативных и чувствительных показателей биологической активности чернозема (длина корней и побегов, всхожесть, активность каталазы, дегидрогеназ и общая численность бактерий) был рассчитан интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почв (1) [19]:

$$B = (B_{ч} / B_{\max}) \times 100, \quad (1)$$

где $B_{ч}$ – относительный балл показателя; B_{\max} – максимальное значение показателя (значение контроля для каждого показателя).

Для расчета ИПБС значение каждого из шести показателей в чистой почве (контроле) принимали в 100 %, а значения в почве с ремедиантом выражали в процентах (2):

$$\text{ИПБС} = (B_{\text{ср}} / B_{\text{ср,max}}) \times 100, \quad (2)$$

где $B_{\text{ср}}$ – средний оценочный балл всех показателей, $B_{\text{ср,max}}$ – максимальный оценочный балл всех показателей.

Для загрязненных почв за 100 % использовали значения показателя в черноземе только при добавлении нефти либо нефтепродукта, в почвах с загрязнителем и ремедиантом значения также выражали в процентах от контроля. После этого определяли среднее значение шести показателей в загрязненной почве.

Статистическую обработку результатов проводили методами вариационного дисперсионного и корреляционного анализа. Рассчитывали следующие показатели вариационной статистики: среднее значение ($M \pm m$), стандартное отклонение (s) и стандартная ошибка среднего (SE). Достоверность отличий оценивали при следующих уровнях значимости: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,005$.

Результаты и обсуждение. Загрязнение нефтью и нефтепродуктами в концентрации 5 % от массы почвы не привело к повышению рН до значений, превышающих нейтральную реакцию среды ($pH = 6,5 \dots 7,5$) и не способствовало сильному изменению содержания легкорастворимых солей. (табл. 3). В большей степени его увеличение наблюдали в черноземах, загрязненных нефтью и бензином. Внесение Байкал ЭМ-1 в незагрязненную почву при любой концентрации ремедианта приводило к недостоверному снижению рН относительно контроля на 3...5 %. В загрязненных нефтью почвах использование препарата способствовало незначительному подкислению среды на 4...5 %, в загрязненных мазутом – подщелачиванию (рН повышался на 2...4 %). В варианте с загрязнением почвы бензином при любой концентрации Байкала ЭМ-1 достоверных отличий от контроля так же не наблюдали.

Табл. 3. Изменение рН и содержания легкорастворимых солей в чистой и загрязненной нефтью и нефтепродуктами почвах при внесении разных доз Байкал ЭМ-1

Показатель	Вариант			
	контроль	$D_{0,5}$	D_1	D_2
чистая почва				
рН	6,2±1,1	6,0±1,0	6,0±0,8	6,0±0,7
Содержание легкорастворимых солей, мг/кг	0,31±0,01	0,23±0,01*	0,22±0,01*	0,32±0,02
нефть				
рН	7,3±1,8	7,0±1,1	7,0±1,4	7,1±1,4
Содержание легкорастворимых солей, мг/кг	0,16±0,01	0,13±0,02*	0,13±0,01*	0,11±0,01*
мазут				
рН	7,1±1,4	7,3±1,1	7,4±1,7	7,3±1,0
Содержание легкорастворимых солей, мг/кг	0,21±0,01	0,32±0,02*	0,31±0,01*	0,84±0,02**
бензин				
рН	7,3±1,7	7,3±1,0	7,4±1,7	7,2±1,7
Содержание легкорастворимых солей, мг/кг	0,25±0,01	0,32±0,02*	0,22±0,01	0,24±0,01

различия с контролем достоверны: * – при $p < 0,05$; ** – при $p < 0,005$.

Реакция среды (рН) определяет направленность почвенных процессов, включая биологические, а также уровень плодородия почв [14]. Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами приводит к подщелачиванию среды (рН до 8,0) и также способствует снижению содержания доступного фосфора [20].

Известно, что для роста и развития большего количества видов растений и почвенных организмов лучше всего подходит реакция почвенного раствора (рН), которая близка к нейтральной. Повышение кислотности (рН<7), как и ее понижение (рН>7), чаще всего негативно сказывается на росте и развитии растений, воздействуя на физиологические показатели, в том числе снабжение растений питательными веществами [14]. Нефтезагрязнение почв сопровождается их хлоридно-натриевым засолением, что ведёт к сложной многофазной перестройке почвенно-поглощающего комплекса (ППК) и общему осолонцеванию почв [21]. Ионы натрия вытесняют из ППК чернозема магний и кальций, на долю которых приходится основная часть обменных катионов в незагрязненной почве. Кроме того, снижается общая поглотительная способность почв, что обусловлено не только уменьшенным количеством поглощенных катионов, но и утратой их обменной способности из-за обволакивания почвенных коллоидов нефтяной пленкой [13, 21].

Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами привело к снижению содержания легкорастворимых солей на 50...60%. Нефть влияла на величину этого показателя сильнее, чем мазут и бензин (см. табл. 3). В почве без загрязнителя Байкал ЭМ-1 уменьшал концентрацию легкорастворимых солей только на 0,1 единицу. В загрязненных нефтью почвах ремедиант не влиял на содержание легкорастворимых солей ни в одной из изучаемых доз. В варианте с мазутом микробиологический препарат в большей степени повышал засоление в дозе Д₂, а в загрязненных бензином почвах незначительное увеличение происходило при внесении Д_{0,5}.

Окислительно-восстановительные условия влияют на характер протекания биохимических процессов в почвах, в том числе на накопление и разложения загрязняющих веществ в почве [22]. Процессы ремедиации загрязненных почв находятся в большой зависимости от окислительно-восстановительных условий [23]. В загрязненных нефтью почвах окислительно-восстановительные процессы сдвигаются в сторону восстановительных. Это ведет к изменению концентрации загрязняющих веществ, а также характера миграции в почвах подвижной фракции водорастворимых элементов (Са, Сl, К) и микроэлементов (Рb, Сu, В, Мо, Ва и др.) [24]. Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) служит индикатором здоровья и состояния загрязненной почвы при ремедиации. В контрольном варианте величина этого показателя составляла 335 мВ. Использование Д_{0,5} Байкала ЭМ-1 способствовало снижению ОВП на 10% (р<0,05). Внесение Д и Д₂ не оказывало достоверного воздействия на ОВП чернозема. Загрязнение чернозема нефтью привело к его незначительному уменьшению, относительно контролю. Внесение Байкала ЭМ-1 в рекомендуемой дозе (Д) при нефтезагрязнении привело к уменьшению ОВП, относительно загрязненного чернозема, на 6% (р<0,05). При других дозах достоверных отличий от контроля не наблюдали. При загрязнении чернозема мазутом и бензином (до внесения Байкал ЭМ-1) наблюдали снижение ОВП на 6 и 8% (р<0,05), относительно контроля. При мазутном загрязнении применение Байкал ЭМ-1 Д_{0,5} снижает ОВП на 7% (р<0,05), по сравнению с контролем.

При других дозах достоверных отличий от контроля не обнаружено.

В условиях нормального увлажнения в ОВП чернозема находится на уровне 400...600 мВ. При снижении ОВП до 350...450 мВ происходит начало смены окислительных условий на восстановительные, а переход ниже 200 мВ свидетельствует об интенсивном протекании в почве восстановительных процессов, которые приводят к аккумулярованию в почвенном растворе вредных для растений концентраций различных метаболитов. Понижение значений ОВП приводит к замедлению разложения растительных остатков, появлению наиболее активных и подвижных форм органических соединений, а также способствует превращению гуминовых кислот в фульвокислоты [14]. Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами, а также применение удобрения Байкал ЭМ-1 в незагрязненных черноземах способствует смене окислительных условий на восстановительные, что может негативно отразиться на некоторых биологических показателях почв.

Воздействие нефтезагрязнения на физико-химические свойства почвы выражается в сильном увеличении ее гидрофобности, что связано с обволакиванием нефтью почвенных частиц. Почва теряет способность впитывать и удерживать влагу, из пор вытесняется воздух, в результате нарушается ее воздушный и водный режимы. Повышение гидрофобности, а также другие изменения физических свойств почвы вызваны тяжелыми фракциями нефтяных углеводородов, в свою очередь прямой токсический эффект нефти и нефтепродуктов на почвы определяют их легкие фракции [25, 26]. Попадая в почву, гидрофобные составляющие нефти и нефтепродуктов обволакивают все доступные части растений, проникают через мембраны клеток, что приводит к ингибированию их развития. Обволакивание корней значительно ухудшает доступ к ним влаги, что может привести к высыханию растения. Также происходит нарушение процессов аммонификации, нитрификации и азотного обмена и как следствие ассимиляционного потенциала почв [20, 27].

Применение Байкал ЭМ-1 приводит к недостоверному увеличению времени впитывания растворов в незагрязненных почвах. Загрязнение черноземов нефтью и мазутом сопровождалось существенным увеличением их гидрофобности в 12 и 4414 раз. Применение Байкал ЭМ-1 в нефтезагрязненной почве снижало время впитывания растворов в варианте с Д_{0,5} на 25%, Д – на 50%, Д₂ – на 58%, по сравнению с загрязненной почвой без ремедианта (табл. 4). Чем меньше времени затрачено на впитывание раствора, тем меньше почва гидрофобна. Исходя из этого можно косвенно судить о восстановлении экологического состояния и разложении нефтяных углеводородов.

Табл. 4. Изменение времени впитывания растворов черноземом обыкновенным при загрязнении нефтью, бензином и мазутом

Вариант	Время впитывания растворов, с			
	чистая почва	нефть	мазут	бензин
Контроль	0	12*	4414*	1
Д _{0,5}	1	9*	4414*	1
Д	1	6*	4414*	1
Д ₂	1	5*	4414*	1

*различия с чистой почвой достоверны при р<0,05.

Согласно используемой шкале (см. табл. 2), изучаемый чернозем относится к не гидрофобным почвам. Внесение Байкал ЭМ-1 в чистую почву не оказало достоверного воздействия на это свойство. Загрязнение нефтью способствовало повышению степени ее гидрофобности до слабогидрофобной, мазута – до чрезвычайно сильногидрофобной. Бензин меньше, чем другие загрязнители, влиял на гидрофобность почв, что объясняется его химическим составом. Этот нефтепродукт содержит легкие углеводородные фракции, которые отчасти испаряются из почвы. Применение Байкал ЭМ-1 в любой дозе не способствовало уменьшению величины изучаемого показателя.

Таким образом, все нефтепродукты приводят к увеличению гидрофобности чернозема обыкновенного, особенно этому способствует мазут. Использование Байкал ЭМ-1 для снижения величины этого показателя имеет смысл только при загрязнении нефтью, где самыми эффективными его дозами являются Д и Д₂.

Результаты изучения показателей фитотоксичности почвы свидетельствуют, что внесение Байкал ЭМ-1 в дозах Д_{0,5}, Д и Д₂ привело к снижению длины побегов редиса на 11, 5 и 24 % (p<0,05), корней – на 43, 40 и 43 % (p<0,05), всхожести – 49, 68 и 59 % (p<0,05) относительно контроля соответственно (рис. 1). При загрязнении нефтью длина побегов, корней и всхожесть уменьшились, по сравнению с контролем, на 92, 89 и 93 % (p<0,05). В варианте с добавлением к этой почве Байкала ЭМ-1 в рекомендуемой дозе семена редиса не взошли. При использовании Д_{0,5} и Д всхожесть возросла, по сравнению с нефтезагрязнением, на 4 и 7 %. При этом длина побегов и корней редиса в варианте Д₂ увеличилась соответственно на 4 и 13 %.

Внесение в почву мазута также приводило к повышению фитотоксичности. При этом длина корней

уменьшалась, по сравнению с незагрязненной почвой, на 88 % (p<0,05), побегов – на 76 % (p<0,05), всхожесть – на 93 % (p<0,05). При внесении Байкал ЭМ-1 в дозах Д_{0,5}, Д и Д₂ в почву с мазутом длина корней была больше, чем в загрязненной почве без ремедианта, на 74, 54 и 42 %, длины побегов – на 71, 67 и 49 %, всхожесть – 54, 46 и 46 %. При этом самой эффективной дозой Байкал ЭМ-1 при мазутном загрязнении была Д_{0,5}, использование которой обеспечило наибольшее увеличение длины побегов и корней редиса на загрязненной почве.

При загрязнении бензином наблюдали снижение всхожести, длины побегов и корней редиса на 57, 34 и 72 % (p<0,05) по сравнению с контролем. При внесении Байкал ЭМ-1 в дозах Д_{0,5} наблюдали ингибирование всхожести, по сравнению с загрязненной почвой, на 7 %, Д – на 24 %, Д₂ – на 7 %. Одновременно установлено увеличение длины побегов соответственно на 16, 15 и 10 %, длины корней – на 7, 9 и 8 %. Самое благоприятное воздействие на состояние растений среди изученных доз оказывала Д_{0,5}. Внесение Байкал ЭМ-1 в любой дозе при загрязнении бензином ингибировало всхожесть семян редиса более чем на 16 %, но при этом вызывало стимуляцию роста наземных побегов и корневой системы. Растения при бензиновом загрязнении после применения Байкал ЭМ-1 имели вытянутые побеги с очень тонкой корневой системой, что свидетельствует о снижении качества продукции при внесении ремедианта.

На основании показателей интенсивности начального роста и прорастания семян редиса можно сделать вывод, что самым токсичным загрязнителем является нефть, наименее опасным – бензин. Самая эффективная доза Байкал ЭМ-1 для улучшения показателей фитотоксичности в почвах, загрязненных нефтью – Д₂, мазутом и бензином – Д_{0,5}.

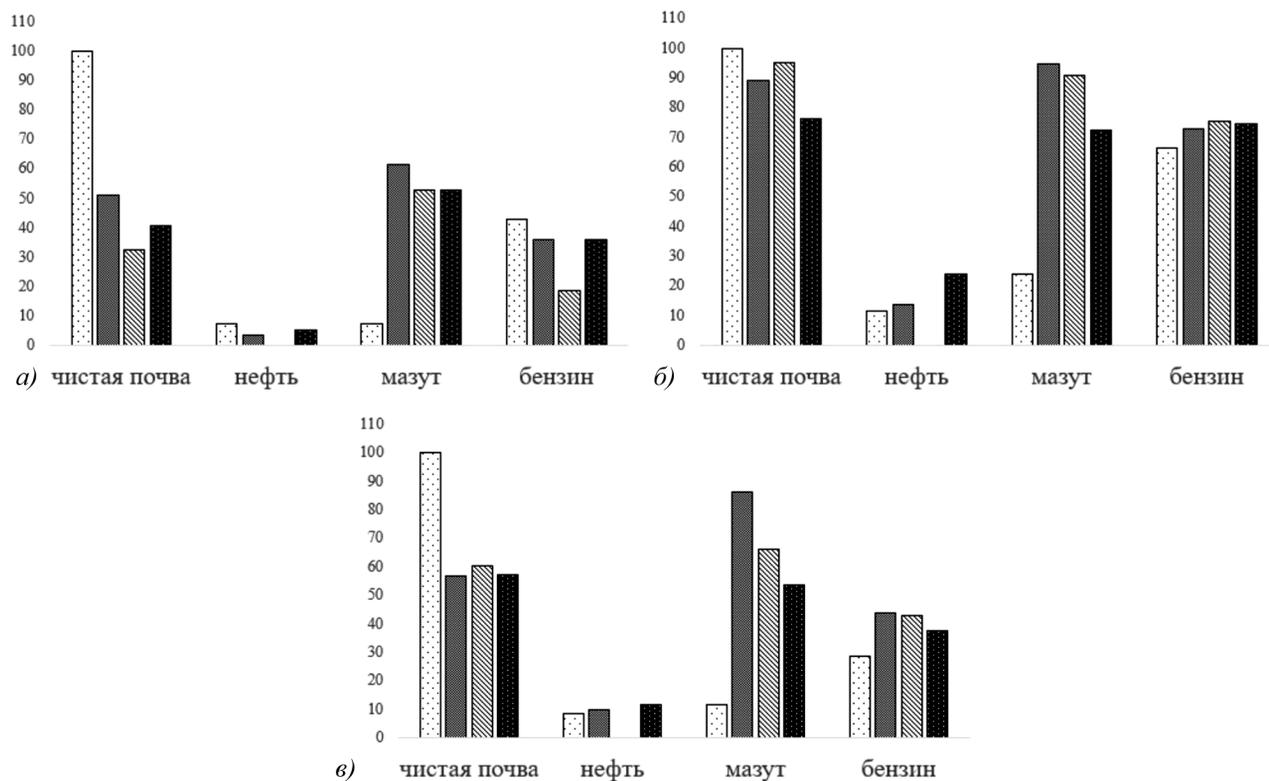


Рис. 1. Изменение фитотоксических показателей чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, бензином и мазутом до и после внесения Байкал ЭМ-1, % от контроля: а) всхожесть; б) длина побегов; в) длина корней: □ – почва; ■ – Д_{0,5}; ▨ – Д; ▩ – Д₂.

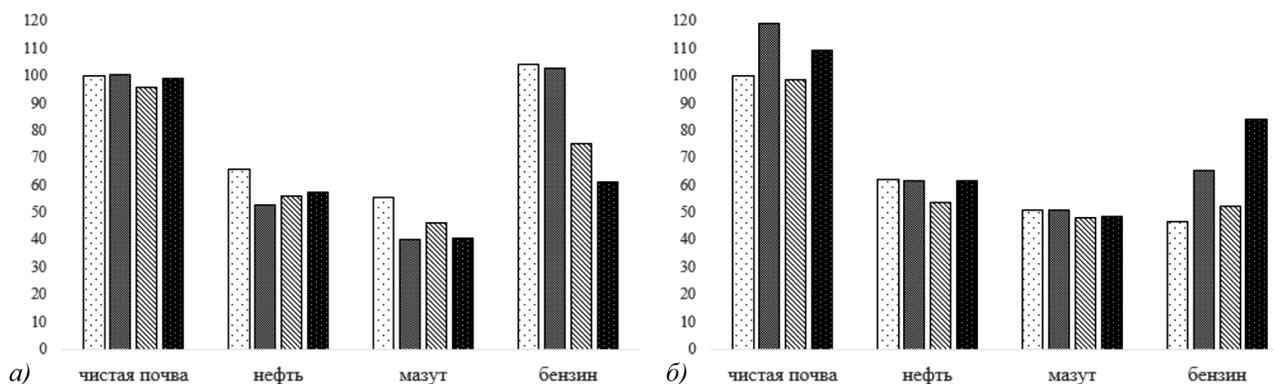


Рис. 2. Изменение ферментативной активности чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, бензином и мазутом до и после внесения Байкал ЭМ-1, % от контроля: а) каталазы; б) дегидрогеназ: □ – почва; ■ – Д_{0,5}; ▨ – Д; ■ – Д₂.

Данные о ферментативной активности в сочетании с другими свойствами дают основу для оценки экологического состояния и качества почв при различных видах антропогенного воздействия [7, 19]. Наиболее информативны в этом отношении при углеводородном загрязнении почв на юге России ферменты класса оксидоредуктаз [3, 11]. Внесение Байкал ЭМ-1 не влияло на активность каталазы, а у дегидрогеназ возросла в варианте Д_{0,5} на 19 % (p<0,05), Д₂ – на 12 % (p<0,05), относительно контроля (рис. 2).

Нефтезагрязнение привело к ингибированию активности дегидрогеназ и каталазы соответственно на 38 и 34 % (p<0,05), относительно контроля. При этом внесение Байкал ЭМ-1 в рекомендуемой дозе (Д) в нефтезагрязненный чернозем ингибировало активность каталазы, относительно загрязненной почвы, на 9 %. В вариантах с использованием Д_{0,5} и Д₂ она снижалась соответственно на 12 и 8 %. Активность дегидрогеназ нефтезагрязненной почвы при Д_{0,5} и Д, не отличалась от варианта без внесения ремедианта. При концентрации Байкал ЭМ-1 в рекомендуемой дозе (Д) она уменьшалась на 7 %.

Загрязнение чернозема мазутом способствовало ингибированию активности каталазы на 46 % (p<0,05), дегидрогеназ – на 48 % (p<0,05), по сравнению с контролем. При внесении Байкал ЭМ-1 в загрязненную мазутом почву в дозе Д_{0,5} происходит дальнейшее ингибирование активности каталазы – на 15 %, Д – на 9 %, Д₂ – на 14 %. Активность дегидрогеназ после внесения биопрепарата во всех дозах практически не изменилась.

Загрязнение почв бензином вызвало ингибирование активности дегидрогеназ на 53 % (p<0,05), по сравнению с контролем. Активность каталазы достоверно не изменилась. При внесении Байкал ЭМ-1 в дозах Д и Д₂ активность каталазы была ингибирована соответственно на 29 % и 42 %, а при Д_{0,5} достоверных отличий от загрязненной почвы не выявлено. Активность дегидрогеназ в варианте Д_{0,5} возросла, относительно загрязненной почвы, на 19 %, Д – на 6 %, Д₂ – на 38 %.

Внесение в незагрязненную черноземную почву Байкал ЭМ-1, нефти, мазута и бензина ингибирует активность почвенных ферментов. Дегидрогеназы в большей степени подвержены влиянию загрязнения почвы нефтью и нефтепродуктами, в то же время использование Байкал ЭМ-1 оказывает наименьшее стимулирующее воздействие на этот фермент. Однако применение ремедианта для активации дегидрогеназ имеет смысл только в случае загрязнения черноземов бензином.

Загрязнение почвы и воды непременно отражается на качественном составе и численности микроорганизмов. Это определяет чувствительность и информативность использования микробиологических показателей при оценке экологического состояния почв. Внесение Байкал ЭМ-1 в чернозем обыкновенный способствовало повышению численности почвенных бактерий относительно контроля в среднем на 29-76 % (рис. 3). Это обусловлено биологической природой ремедианта, а именно наличием в его составе штаммов полезных микроорганизмов.

В при загрязнении почвы нефтью, мазутом и бензином происходит снижение численности бактерий на 63, 77 и 62%, по сравнению с контролем. Восстановление таких почв с использованием Байкал ЭМ-1 в дозах Д_{0,5}, Д и Д₂ привело к повышению количества бактерий в почве с мазутом и бензином на 27 и 12 %, 49 и 29 %, 47 и 15 %, относительно загрязненной почвы, соответственно. В варианте с мазутом и бензином лучшие результаты обеспечило применение Байкала ЭМ-1 в концентрации Д.

С целью интегральной оценки изменения почвенных свойств при ремедиации загрязненного чернозема Байкал ЭМ-1 на основании всех информативных и чувствительных показателей биологической активности почв была применена разработанная на кафедре экологии и природопользования ЮФУ методика расчета

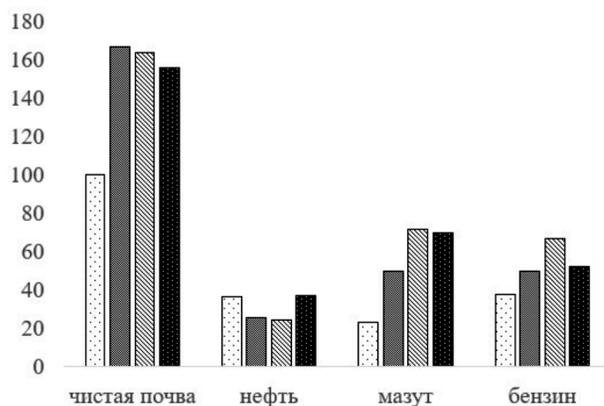


Рис. 3. Изменение общей численности бактерий чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, бензином и мазутом до и после внесения Байкал ЭМ-1, % от контроля: □ – почва; ■ – Д_{0,5}; ▨ – Д; ■ – Д₂.

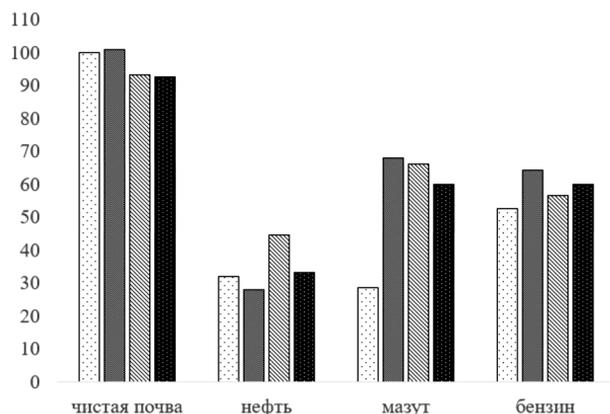


Рис. 4. Интегральный показатель биологического состояния чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, бензином и мазутом до и после внесения Байкал ЭМ-1, % от контроля: □ – почва; ■ – D_{0,5}; ▨ – D; ■ – D₂.

интегрального показателя биологического состояния почв (ИПБС).

ИПБС чернозема обыкновенного при воздействии Байкал ЭМ-1 достоверно не отличался от контроля (рис. 4). Внесение нефти, мазута и бензина уменьшало его величину, относительно контроля, соответственно на 68, 71 и 47 %. Наибольшее токсическое воздействие на почву оказывал мазут, снижая ИПБС чернозема на 71 %. При этом согласно результатам предыдущих исследований, почва выполняет свои экофункции нормально, если ИПБС уменьшился не более чем на 5 % [17]. В случае снижения ИПБС от 5 до 10 % происходит нарушение информационных экосистемных функций, от 10 до 25 % также нарушаются биохимические, химические, физико-химические и целостные экосистемные функции, более чем на 25 % – нарушению всех функций, в том числе физических и экосистемных.

При загрязнении нефтью использование Байкал ЭМ-1 в дозе Д увеличивало ИПБС на 12 %. При использовании биопрепаратов в остальных дозах достоверный эффект отсутствовал. В вариантах с мазутом внесение Байкал ЭМ-1 в дозе D_{0,5} величина ИПБС возрастала на 39 %, D – на 37 %, D₂ – на 31 %, с бензином – повышение составило 11, 3 и 7 % соответственно. Наиболее эффективной дозой согласно ИПБС для этих двух загрязнителей была D_{0,5}.

В целом согласно оценке ИПБС наиболее токсичным оказался мазут. Наименее токсичный нефтепродукт – бензин, при этом применение Байкал ЭМ-1 на почвах, загрязненных бензином, менее эффективно, чем при загрязнении мазутом.

Таким образом, внесение Байкал ЭМ-1 в чернозем, загрязненный нефтью, мазутом и бензином, в незначительной степени снижает гидрофобность, стабилизирует окислительно-восстановительные условия в почве и реакцию почвенной среды (рН). Биологические показатели чутко реагируют на загрязнение чернозема нефтью и продуктами ее переработки. Наибольший отклик на применение Байкал ЭМ-1 продемонстрировали показатели фитотоксичности и активности каталазы. По результатам оценки ИПБС наиболее токсичный нефтепродукт – мазут, наименее – бензин. Применение Байкал ЭМ-1 на почвах, загрязненных бензином, менее эффективно, чем при загрязнении мазутом и нефтью. Самой эффективной дозой Байкал ЭМ-1 для восстановления экологического состояния чернозема при загрязнении

нефтью была рекомендуемая производителем препарата (D), интегральный показатель биологического состояния увеличился на 12 % относительно контроля. При загрязнении мазутом и бензином лучшие результаты отмечены при использовании половинной дозы (D_{0,5}), рост ИПБС составил 39 и 11 % соответственно.

Литература.

1. *Statistical Review of World Energy 2021, 70th edition.* URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения: 22.02.2022)
2. *Investigating the potential of sunflower species, fermented palm wine and Pleurotus ostreatus for treatment of petroleum-contaminated soil / U.J. Dickson, M. Coffey, R.J.G. Mortimer, et al. // Chemosphere. 2020. Vol. 240. P. 124881. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124881* URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519321204?via%3Dihub> (дата обращения: 22.02.2022).
3. *Bioremediation of fuel oil polluted soil by vermiculture of E. Fetida, E. Andrei, D. Veneta and their probiotics / S.B. Chachina, N.A. Voronkova, M.A. Gross, et al. // AIP Conference Proceedings. «Oil and Gas Engineering, OGE 2021». 2021. 020004. doi: 10.1063/5.0075858.* URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0075858> (дата обращения: 19.02.2022)
4. *Bioremediation of soil of the Kola peninsula (Murmansk region) contaminated with diesel fuel / M.V. Korneykova, V.A. Myazin, N.V. Fokina, et al. // Geography, Environment, Sustainability. 2021. Vol. 14. No. 1. P. 171-176. doi: 10.24057/2071-9388-2019-170.*
5. *Минникова Т.В., Колесников С.И., Денисова Т.В. Влияние азотных и гуминовых удобрений на биохимическое состояние нефтезагрязненного чернозема // Юг России: Экология, развитие. 2019. Т. 14. №2. С. 189-201.*
6. *Evaluating the biological activity of oil-polluted soils using a complex index / R.R. Kabirov, L.M. Safullina, N.A. Kireeva, et al. // Eurasian Soil Science. 2012. Vol. 45. No. 2. P. 157-161.*
7. *Халилова Д.И., Юнусова Д.М. Анализ методов очистки нефтезагрязненных почв при авариях на объектах нефтегазовой отрасли и транспорте // Бюллетень результатов научных исследований. 2017. № 1–2. URL: [http://brni.info/archive/2017/1-2-\(22-23\).html](http://brni.info/archive/2017/1-2-(22-23).html) (дата обращения: 19.02.2022).*
8. *Тимофеева С.С., Рябчикова И.А., Иванова С.В. Исследование возможностей биоремедиации загрязненных почв с использованием ЭМ-препаратов // Вестник Казанского технологического университета. 2016. №21. С. 188-192.*
9. *Chachina S.B., Voronkova N.A., Baklanova O.N. Biological remediation of the engine lubricant oil-contaminated soil with three kinds of earthworms, Eisenia Fetida, Eisenia Andrei Dendrobena Veneta, and a mixture of microorganisms // Procedia Engineering. 2015. Vol. 113. P. 113-123*
10. *The recultivation of the soils, contaminated with petrol and diesel fuel, with the help of earthworms Dendrobena veneta and the complex of microorganisms / S.B. Chachina, N.A. Voronkova, M.A. Shadrin, et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. 52065. doi: 10.1088/1755-1315/315/5/052065. URL: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1120504661> (дата обращения: 20.02.2022)*

11. Оценка агроэкологических показателей нефтезагрязненного чернозема Ростовской области при ремедиации мочевиной и гуматом калия / Т.В. Минникова, Т.В. Денисова, С.И. Колесников и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2018. №1. С. 44-48.
12. Экологически безопасные концентрации нефти в почвах черноморского побережья Кавказа / А.А. Кузина, С.И. Колесников, Т.В. Минникова и др. // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 11. С. 61-65. doi: 10.18412/1816-0395-2021-11-61-65
13. Алканы как компоненты углеводородного состояния почв: поведение, индикационное значение / А.Н. Геннадиев, Ю.А. Завгородняя, Ю.И. Пиковский и др. // *Почвоведение*. 2018. № 1. С. 37-47. doi: 10.7868/S0032180X18010045
14. Методы биодиагностики наземных экосистем / К.Ш. Казеев, С.И. Колесников, Ю.В. Акименко и др. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2016. 356 с.
15. Проблемы с гидрофобностью почвы и пути их решения / Л.В. Архипова, О.В. Кормилицына, В.В. Бондаренко и др. // *Вестник МГУЛ. Лесной вестник*. 2007. № 7. С. 102-106.
16. Nikolaeva O.V., Terekhova V.A. Improvement of laboratory phytotest for the ecological evaluation of soils // *Eurasian Soil Science*. 2017. No. 50. P. 1105-1114, doi: 10.7868/S0032180X17090052
17. Денисова Т.В., Мазанко М.С., Колесников С.И. Влияние сочетанного воздействия переменного магнитного поля и загрязнения свинцом на биологические свойства почв юга России // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020. Т. 60. № 6. С. 609-621. doi: 10.31857/S0869803120060168.
18. Akimenko Y.V., Kazeev K.S., Kolesnikov S.I. The impact of antibiotics (benzylpenicillin, and nystatin) on the biological properties of ordinary chernozems // *Eurasian Soil Science*. 2014. Vol. 47. No. 9. P. 910-916. doi: 10.7868/S0032180X14070028
19. Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019. Vol. 191. No. 544. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-019-7718-3> (дата обращения: 20.02.2022)
20. Maslov M.N., Maslova O.A., Ezhlev Z.S. Microbiological transformation of organic matter in oil-polluted tundra soils after their reclamation // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 1. P. 58-65. doi: 10.1134/S1064229319010101
21. Булуктаев А.А. Изменение солевого состава почв Черных земель при нефтяном загрязнении // *Юг России: экология, развитие*. 2018. № 2. P. 184-195. doi: 10.18470/1992-1098-2018-2-184-195
22. Husson O. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy // *Plant and Soil*. 2013. No. 362. P. 389-417.
23. Шигаева Т.Д., Поляк Ю.М., Кудрявцева В.А. Окислительно-восстановительный потенциал как показатель состояния объектов окружающей среды // *Биосфера*. 2020. Т. 12. № 3. С. 111-124. doi: 10.24855/BIOSFERA.V12I3.549.
24. Руденко Е.Ю. К перспективам использования отходов пивоварения для рекультивации нефтезагрязненных почв // *Экология и промышленность России*. 2012. № 2. С. 34-38.
25. Иларионов С.А., Назаров А.В., Калачникова И.Г. Роль микромицетов в фитотоксичности нефтезагрязненных почв // *Экология*. 2003. № 5. С. 341-346.
26. Microorganisms in the elimination of oil pollution consequences (review) / T.Y. Korshunova, S.P. Chetverikov, M.D. Bakaeva, et al. // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2019. Vol. 55. No. 4. P. 344-354. doi: 10.1134/S0003683819040094
27. К вопросу о разработке ПДК нефти и нефтепродуктов в различных типах почв на основе их ассимиляционного потенциала (на примере почв Азербайджана) / М.П. Бабаев, Н.М. Исмаилов, С.И. Наджафова и др. // *Почвоведение*. 2020. № 11. С. 1393-1400. doi: 10.31857/S0032180X20110040

Поступила в редакцию 30.03.2022
 После доработки 25.04.2022
 Принята к публикации 12.05.2022