

УДК 632.122.2:531.631.878:631.445.41

## ВЛИЯНИЕ БИОЧАРА НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ОБЫКНОВЕННОГО ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ, БЕНЗИНОМ И МАЗУТОМ<sup>§</sup>

© 2022 г. Т. В. Минникова<sup>1,\*</sup>, А. С. Русева<sup>1</sup>, С. И. Колесников<sup>1</sup>,  
С. Ю. Ревина<sup>1</sup>, В. Г. Гайворонский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет  
344006 Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42, Россия

\*E-mail: loko261008@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.01.2022 г.

После доработки 20.04.2022 г.

Принята к публикации 10.06.2022 г.

В работе оценили влияние биочара (древесного угля особой обработки) на экологическое состояние чернозема обыкновенного при загрязнении нефтью, бензином и мазутом. Для оценки экологического состояния моделировали загрязнение чернозема нефтью, бензином и мазутом в лабораторных условиях с последующим внесением биочара. Оценку экологического состояния проводили по реакции почвенной среды (рН), общему содержанию легкорастворимых солей, изменению окислительно-восстановительного потенциала, гидрофобности почв, эмиссии CO<sub>2</sub>, фитотоксическим показателям тест-растений редиса. Бензин в почве при внесении биочара повышал щелочность почвы, изменял величину окислительно-восстановительного потенциала на восстановительный режим. Установлено, что биочар в дозе B<sub>0,5</sub> увеличивал интенсивность эмиссии CO<sub>2</sub> в почве с мазутом и бензином на 41–129%. При этом длина побегов и корней редиса в почве с нефтью и бензином была простимулирована только при внесении B<sub>2,0</sub>. Биочар за 30 сут эксперимента стимулировал экологические свойства почв с мазутом и бензином. Ряд устойчивости черноземов к внесению биочара по показателям экологического состояния следующий: мазут (86) > бензин (82) > нефть (57). Для восстановления экологических свойств почвы с нефтью требуется более продолжительный период ремедиации, чем 30 сут проведенного опыта.

*Ключевые слова:* биочар, нефтяные углеводороды, биологическая активность почв, биодиагностика.

DOI: 10.31857/S0002188122090095

### ВВЕДЕНИЕ

Нефтяные углеводороды оказывают негативное воздействие на состояние окружающей среды, в том числе почвы [1–6]. После загрязнения почва содержит в своем составе преимущественно поверхностно-активные углеводороды (ПАУ) и соединения неуглеводородных компонентов [7]. Следует отметить, что в состав неуглеводородных компонентов входит небольшое количество тяжелых металлов, обладающих высокой токсичностью, стойкостью и огнеупорностью [8].

Одним из способов восстановления экологического состояния почв является внесение специальных веществ – ремедиантов. К этой широкой группе относят вещества, благотворно влияющие на форму нахождения металлов в почве, способствуют повышению биологической активности почв и восстановлению экологического состояния за счет различных механизмов воздействия на загрязняющие вещества [3, 4, 9–12]. Для восстановления плодородия таких почв следует применять экономичные и эффективные методы биологической ремедиации [13, 14]. Установлено, что по сравнению с механической очисткой почв от нефти и нефтепродуктов цена внесения сорбентов и ремедиантов при биорекультивации нефтезагрязненных почв составляет от 1.0–4.3 до 1.1–18.3 млн руб./га в зависимости от типа и дозы сорбента, в то время как стоимость механической рекультивации в 3–4 раза больше.

<sup>§</sup> 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).

В связи с этим необходимо осуществлять поиск эффективных сорбентов химических загрязнителей, не наносящих вред окружающей среде, при нужной селективности поглощения. К одному из таких веществ органического происхождения относят биочар. Согласно Международной инициативе биочара – International Biochar Initiative (IBI) – наиболее стандартизированное определение биоугля – это твердый материал, производимый путем термохимической конверсии биомассы в анаэробных условиях [15–17]. Биочар является хорошим сорбентом и биостимулятором при различных видах загрязнения почв, как полициклические ароматические углеводороды, нефтяные углеводороды и тяжелые металлы [6, 18–21]. Кроме того, применение биочара в почве связано не только с его высоким содержанием углерода, но также со свойствами кондиционирования почвы [22–24]. При внесении биочара в почву с органическими поллютантами он действует как катализатор, окислитель, обеспечивает адсорбцию и разложение веществ [21, 25]. При этом биочар благоприятно влияет не только на содержание нефтяных углеводородов, но и на биологические и физические свойства почв [26]. Однако ранее не было изучено влияние ремедиантов на разложение нефтяных углеводородов в виде продуктов нефти, таких как бензин, мазут [2, 27]. Цель работы – оценка влияния биочара на экологическое состояние чернозема обыкновенного при его загрязнении нефтью, бензином и мазутом.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – чернозем обыкновенный карбонатный или *Typic Chernozem Calcic* (WRB, 2015). Место отбора почвы – Ботанический сад Южного федерального университета (координаты места отбора почв: 47°14'17.54"N 39°38'33.22"E). Почва обладала следующими свойствами: рН 8.3, содержание гумуса – 4.2%, запасы карбонатов кальция – 2400 т/га, поглощенные  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  – 40 мг-экв/100 г, ЕКО – 40–45 мг-экв/100 г [28].

Для загрязнения почв использовали нефть с плотностью 0.861 кг/м<sup>3</sup>, содержанием серы – 1.34%, массовой долей воды – 0.27%, концентрацией хлористых солей – 73 мг/дм<sup>3</sup>, массовой долей механических примесей – 0.006%, массовой долей парафина – 4.46%. Мазут исследовали с плотностью 923.4 кг/м<sup>3</sup>, вязкостью условной – 3.8, вязкостью кинематической – 29 мм<sup>2</sup>/с, температурой застывания – 15°C, содержанием серы – 1.71%, зольностью – 0.06%, с массовой долей воды – 0.09%. Бензин – с октановым числом 95.1,

массовой долей серы – <3 мг/кг, с массовой долей кислорода – 0.15%, с объемной долей этанола – 0.17%, изопропилового спирта – 0.17%, третбутилового спирта – 0.17%, изобутилового спирта – 0.17%, эфиров – 0.8%.

Биочар (Б) произведен компанией ООО “Диан Агро” при температуре 360–380°C из древесины березы (*Betula alba*) (марка А), ГОСТ 7657-84, без доступа кислорода, на ретортных установках. Фракции биочара имели размер частиц угля 0.5–5.0 см, рН 7.8, содержание С – 80–85, Н – 7.4, О – 43, N – 10.2, зола – 40–44%. Концентрация биочара, выбранная для восстановления состояния нефтезагрязненных почв, зависела от множества факторов: температуры пиролиза, вида исходного сырья, площади поверхности, пористости, фракционного состава, времени инкубации, содержания макроэлементов, функциональных групп и других факторов [29–32]. Рекомендуемой концентрации березового биочара в настоящее время не определено, но существуют лишь локальные предложения по ремедиации почв, загрязненных нефтяными углеводородами, при этом концентрация варьируется от 1 до 20% биочара от сухой массы почвы [6, 33, 34]. В почву вносили 5% биочара от массы почвы. Биочар вносили в почву после загрязнения нефтью и тщательно перемешивали. Для модельного эксперимента исследовали следующие концентрации биочара: предложенная концентрация биочара  $B_{1,0}$  – 5%, меньше в 2 раза от предложенной концентрации –  $B_{0,5}$  (2.5%) и больше в 2 раза от предложенной концентрации –  $B_{2,0}$  (10%).

Для модельного эксперимента почву отбирали из верхнего пахотного горизонта (0–20 см), просушивали при комнатной температуре, тщательно перебирали от корней и прочих растительных компонентов. Для сохранения структуры почвы ее просеивали через сито 3 мм. В каждый вегетационный сосуд помещали 200 г почвы. Опыт выполнен в трехкратной повторности. Почву увлажняли и вносили нефть 5% от массы почвы. Почву с нефтью тщательно перемешивали. После этого этапа в почву с нефтью вносили биочар, предварительно измельченный и просеянный через сито 0.5 см. Почву с биочаром тщательно перемешивали во всем объеме сосуда. Вегетационные сосуды инкубировали при температуре 24–25°C при поддержании влажности почвы на уровне 25–30% в климатической камере Binder.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. По истечении 30 сут от начала эксперимента почву доводили до воздушно-сухого состояния с последующим определением показателей ее экологического состояния.

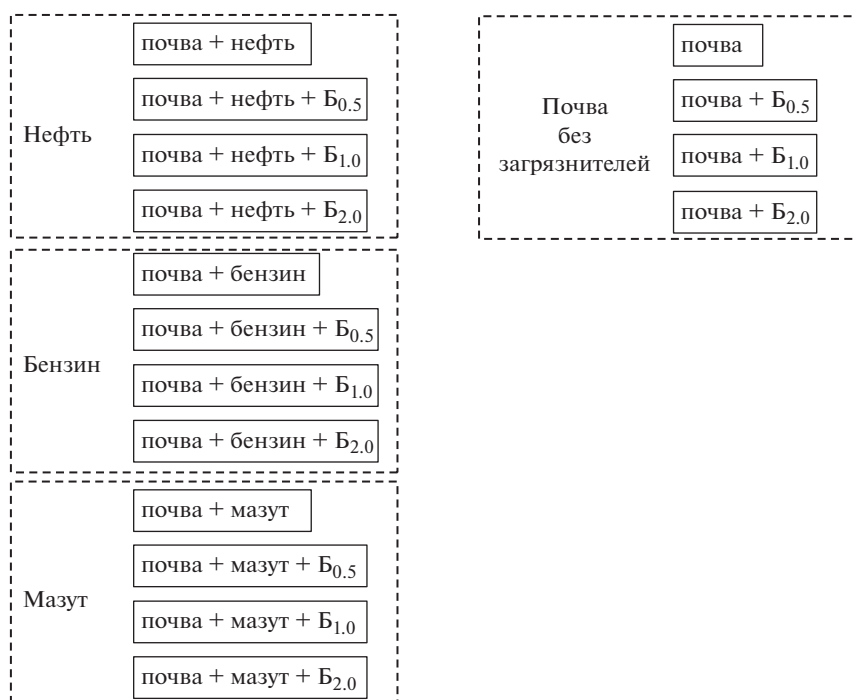


Рис. 1. Схема модельного эксперимента.

Оценку экологического состояния проводили по следующим показателям: реакция почвенной среды (рН), общее содержание легкорастворимых солей, окислительно-восстановительный потенциал, эмиссия CO<sub>2</sub>, оценка гидрофобности, изменение фитотоксических свойств [35] (табл. 1).

Реакцию почвенной среды оценивали по стандартному методу оценки в почвенной вытяжке (почва : вода = 1 : 2.5) потенциометрическим методом на анализаторе HANNA HI 2211.

Общее содержание легкорастворимых солей в почве было определено кондуктометрическим методом в почвенной вытяжке (почва : вода = 1 : 2.5) анализатором HANNA inst. Total Dissolved HI 9034. Измерение проводили в мг/кг. Измерение данного показателя позволило определить степень засоленности почв (>5–7 г/л по ГОСТ 26423-85) [36]. Проходящие в почве биохимические процессы непосредственно связаны с окислительно-восстановительными условиями в почве, в том числе при загрязнении [37–40].

Таблица 1. Показатели экологического состояния почв

Показатель	Единица измерения	Метод измерения
Кислотность почв (рН)	ед. рН	Потенциометрический метод
Общее содержание легкорастворимых солей	мг/кг	Кондуктометрический метод
Окислительно-восстановительный потенциал	мВ	Вольтамперометрический метод
Гидрофобность почв	—	Оценка с помощью теста EP и WDPT
Эмиссия CO <sub>2</sub>	мг С/кг	Измерение портативным газоанализатором EGM-5 PP Systems (США)
Всхожесть	%	Оценка интенсивности начального роста редиса через 7 сут после начала вегетационного эксперимента
Длина побегов	мм	Оценка длины побегов редиса посевного через 7 сут после начала вегетационного эксперимента
Длина корней	мм	Оценка длины корней редиса посевного через 7 сут после начала вегетационного эксперимента

Окислительно-восстановительный потенциал определяли в почвенной вытяжке (почва : вода = 1 : 2.5) потенциометрическим методом на анализаторе ORP by HANNA HI 98120. Гидрофобность почв оценивали с помощью теста процентного содержания этанола — Ethanol Percentage (EP) и Water Drop Penetration Time (WDPT) [41, 42]. Тест WDPT измеряет, как долго отталкивающая способность сохраняется на поверхности почвы. Суть теста состоит в размещении капли дистиллированной воды на поверхности почвы и регистрации времени, необходимого для полного проникновения капли воды в почву. Для каждого теста WDPT небольшое количество почвы помещали в чашку Петри и выравнивали. Четыре капли (0.5 мкл) дистиллированной воды при 20°C наносили шприцем на поверхность образцов почвы. Время проникновения для каждой капли было зарегистрировано, и среднее время проникновения, принятое в качестве представителя WDPT для каждого образца. Классы WDPT были классифицированы в соответствии с методиками [42, 43]: смачиваемый (класс 1, WDPT ≤ 5 с), слегка водоотталкивающий (2, WDPT = 5–60 с), сильно водоотталкивающий (3, WDPT = 60–600 с). Интенсивность водопрочности измеряли с использованием теста процентного содержания этанола (EP) [41, 42]. Шесть капель стандартизированных растворов этанола в воде (0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 и 35%) наносили на образцы почвы и наблюдали их поведение при мгновенной или кратковременной инфильтрации.

Выделение почвой CO<sub>2</sub> оценивали в течение всего эксперимента (с интервалом 3–4 сут) с помощью портативного газоанализатора EGM-5 PP Systems (США). Использовали инновационную технологию “Auto-Zero” и изолированную оптическую скамью с термостатическим управлением, которые обеспечивают быстрый прогрев, долговременную стабильность, точность и калибровку анализатора. Прибор оснащен внутренней перезаряжаемой литий-ионной батареей 7.2 В, обеспечивающей до 16 ч непрерывной работы. Это высокоточный, компактный не дисперсионный инфракрасный анализатор CO<sub>2</sub> с автоматической компенсацией температуры и давления. Точность определения составляет <1% от концентрации шкалы в калиброванном диапазоне.

Фитотоксичность почв оценивали по изменению показателей тест-растений редиса посевного (*Raphanus sativus* L.) сорта “18 дней” стандартными методами по изменению интенсивности начального роста (всхожести) и морфометрическим показателям (изменение длины побегов и корней) через 7 сут после начала вегетационного эксперимента и после его окончания (длительность

30 сут) [35]. Посев проводили в чашки Петри по 25 семян в каждую чашку в 3-кратной повторности. На протяжении 7 сут поддерживали температуру и воздухообмен в чашках. По истечении недели каждое растение извлекали из почвы, промывали и измеряли длину надземной части (побега) и корневой системы в миллиметрах. Результаты были обработаны как среднее повторностей в варианте.

Статистическая обработка полученных данных была проведена с использованием программного пакета Statistica 12.0. Статистические показатели (средние, дисперсия) были определены, а надежность различных образцов была установлена с использованием дисперсионного анализа (Student *t*-test).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Изменение физико-химических свойств чернозема.* На скорость разложения нефти и нефтепродуктов оказывает влияние реакция почвенной среды, а также окислительно-восстановительный потенциал и содержание легкорастворимых солей [19]. Поскольку повышение рН может значительно снизить эффективность биоремедиации, следует провести дополнительные исследования в этой области. В табл. 2 представлены данные величины рН, общего содержания легкорастворимых солей и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП).

Показатель рН для почвы без нефти, мазута и бензина соответствовал слабокислой реакции среды независимо от концентрации внесенного в почву биочара. После внесения нефти, мазута и бензина реакция среды повышалась до слабощелочной рН 7.2–7.3. Особенно сильное подщелачивание обнаружено в почве с бензином при любой концентрации биочара: на 16–17% больше, чем в контроле. При этом только при внесении биочара B<sub>0,5</sub> и B<sub>1,0</sub> в почву с нефтью реакция среды стабилизировалась: величины рН были больше только на 11 и 12% от контроля соответственно.

Содержание легкорастворимых солей в загрязненном черноземе варьировалось от 0.28–0.37 мг/кг. При внесении биочара в концентрации B<sub>2,0</sub> в почву с мазутом общее содержание легкорастворимых солей снижалось на 11%. Остальные концентрации биочара не оказали воздействия на общее содержание легкорастворимых солей. При загрязнении нефтью установлено снижение содержания солей при любой концентрации биочара на 58–60% по сравнению с контролем (0.10–0.13 мг/кг).

В почве с бензином и мазутом содержание солей снижалось в меньшей степени, чем при за-

грязнении нефтью – на 14 и 20% соответственно. Наименьшее снижение общего содержания легкорастворимых солей по сравнению с контролем обнаружено в почве с бензином – на 10–12% меньше контроля. Окислительно-восстановительный потенциал почв без загрязнения нефтью и нефтепродуктами варьировался в диапазоне 310–335 мВ, в образцах почвы с нефтью – 322–327, мазутом – 309–317, бензином – 292–309 мВ. Такие различия между ОВП с разными нефтепродуктами были обусловлены переходом из окисленной в восстановленную форму с активизацией процессов денитрификации и повышения концентрации закисных соединений железа и марганца. Выявленная тенденция к восстановительному режиму прослежена в почве с бензином. Опасность перехода почвы в восстановительную форму может привести к изменению физических, биохимических показателей почв и влияет на плодородие [38, 44]. При ОВП, равном +250 мВ и меньше, в почве накапливаются восстановленные соединения железа, марганца, ртути в количествах, токсичных для растений.

*Изменение гидрофобности чернозема.* На рис. 2 представлено изменение гидрофобности почв, загрязненных нефтью, мазутом и бензином с последующим внесением биочара. После внесения биочара в концентрациях  $B_{1,0}$  и  $B_{2,0}$  почва с нефтью становилась более гидрофильной. Наибольшую гидрофобность установили для почв, загрязненных мазутом при всех концентрациях биочара. Это было связано с высокой плотностью и вязкостью мазута. Концентрация биочара оказывала воздействие на гидрофильность почвы при ее загрязнении нефтью. Чем больше была концентрация биочара, тем быстрее почва становилась гидрофильной.

Гидрофильность почвы служит косвенным индикатором процессов восстановления почвы: чем больше скорость пропускания влаги, тем лучше структура почвы и ее физические, физико-химические показатели. При изменении этих свойств почвы происходит воздействие на биохимические и микробиологические составляющие почвы, а значит на ее плодородие [45].

*Изменение эмиссии  $CO_2$ .* В чистой почве без нефти и нефтепродуктов наблюдали эмиссию  $CO_2$  в течение всего срока наблюдения до 1500 мг С/кг. Высокая гидрофобность нефтепродуктов, особенно мазута, значительно снижает биохимическую активность почв и продуктивность растений [46, 47]. На рис. 3 показано, что биочар в чистой почве оказывал стимулирующее влияние на эмиссию  $CO_2$ , увеличив ее на 13–36%. Биочар не оказывал значительного воздействия на концентрацию  $CO_2$  в почве с нефтью за 30 сут экспери-

**Таблица 2.** Изменение физико-химических свойств чернозема при загрязнении нефтью, мазутом и бензином

Вариант	pH	Общее содержание легкорастворимых солей, мг/кг	Окислительно-восстановительный потенциал, мВ
Без загрязнителей			
0	6.20 ± 0.12	0.28 ± 0.01	335.0 ± 2.0
$B_{0,5}$	6.20 ± 0.01	0.29 ± 0.02	315.3 ± 7.8
$B_{1,0}$	6.20 ± 0.01	0.25 ± 0.01	322.0 ± 1.5
$B_{2,0}$	6.40 ± 0.02	0.37 ± 0.01	310.5 ± 1.2
Нефть			
0	7.30 ± 0.11	0.13 ± 0.01	324.0 ± 2.3
$B_{0,5}$	6.90 ± 0.12	0.10 ± 0.01	322.3 ± 0.7
$B_{1,0}$	7.00 ± 0.11	0.10 ± 0.01	325.3 ± 0.8
$B_{2,0}$	7.10 ± 0.15	0.12 ± 0.01	327.0 ± 0.6
Мазут			
0	7.10 ± 0.04	0.24 ± 0.02	317.0 ± 5.0
$B_{0,5}$	7.10 ± 0.05	0.30 ± 0.03	315.0 ± 2.3
$B_{1,0}$	7.20 ± 0.04	0.25 ± 0.02	316.7 ± 0.8
$B_{2,0}$	7.30 ± 0.02	0.33 ± 0.02	309.0 ± 2.1
Бензин			
0	7.30 ± 0.01	0.22 ± 0.01	309.3 ± 4.6
$B_{0,5}$	7.30 ± 0.01	0.25 ± 0.01	292.7 ± 4.7
$B_{1,0}$	7.30 ± 0.12	0.25 ± 0.02	307.7 ± 2.0
$B_{2,0}$	7.30 ± 0.02	0.24 ± 0.01	309.3 ± 1.2

Примечание.  $B_{1,0}$  – предложенная доза биочара (5% массы почвы),  $B_{0,5}$  – половинная доза от предложенной дозы биочара,  $B_{2,0}$  – удвоенная предложенная доза биочара.

мента. В почве с мазутом при концентрации  $B_{2,0}$  эмиссия  $CO_2$  ингибировалась на 52%. При внесении  $B_{0,5}$  в почву с мазутом установлено повышение эмиссии  $CO_2$  на 26-е сут на 41%. Напротив, в почве с бензином при внесении  $B_{1,0}$  и  $B_{0,5}$  наблюдали рост концентрации  $CO_2$  на 114–129%. Внесение двойной дозы биочара вызывало ингибирование интенсивности дыхания почвы в период окончания эксперимента. Внесение микробиологических препаратов, инокулированных на гранулированные активированные угли, показало свою эффективность в разложении нефтяных углеводородов в почве. Одним из косвенных показателей разложения нефти является увеличение концентрации  $CO_2$ . Применение биоугля создает лучшие условия для разлагающих микроорганизмов и роста растений за счет обратимой адсорбции токсичных компонентов и метаболитов нефти, повышения водоудерживающей способности почвы и общей пористости [48].

Вариант эксперимента	Концентрация этанола, %						
	0	5	10	15	25	30	35
Контроль (К) – незагрязненная почва контроль + B <sub>0.5</sub> B <sub>1.0</sub> B <sub>2.0</sub>	[График с заливкой, показывающей изменение гидрофобности в зависимости от концентрации этанола для различных вариантов эксперимента]						
почва + нефть нефть + B <sub>0.5</sub> B <sub>1.0</sub> B <sub>2.0</sub>							
почва + мазут мазут + B <sub>0.5</sub> B <sub>1.0</sub> B <sub>2.0</sub>							
почва + бензин бензин + B <sub>0.5</sub> B <sub>1.0</sub> B <sub>2.0</sub>							
Степень гидрофобности	Продолжительность, сек		Этанол, %		Индикатор		
гидрофильные	<10		0				
слабо гидрофобные	10–60		5				
гидрофобные	60–600		10–15				
сильно гидрофобные	600–3600		25				
очень сильно гидрофобные	>3600		30–35				

Рис. 2. Изменение гидрофобности чернозема, загрязненного нефтью, мазутом и бензином после применения биочара.

Изменение всхожести, длины побегов и корней тест-растений редиса. Фитотоксические показатели редиса в чистой почве с внесением биочара изменялись в зависимости от концентрации биочара в почве (рис. 4). Всхожесть редиса при концентрациях внесения B<sub>0.5</sub> и B<sub>1.0</sub> была значительно меньше контроля. Только при дозе B<sub>2.0</sub> наблюдали ее повышение до уровня контроля. Установлено ингибирование длины побегов и корней редиса на незагрязненной почве с биочаром. В почве с нефтью всхожесть не достигла уровня контроля при любой концентрации биочара. При внесении Б в почву с мазутом наблюдали восстановление всхожести до уровня контроля, с бензином – при внесении дозы B<sub>2.0</sub>. Восстановление длины побегов и корней редиса до уровня контроля при загрязнении почвы бензином происходило после внесения дозы B<sub>2.0</sub>. Внесение той же дозы биочара в почву с нефтью стимулировало длину побегов и корней, но они отличалась от контроля на 35 и 23% соответственно. Выращивание пшеницы яровой (*Triticum vulgare* L.) и гороха посевного (*Pi-*

*sum sativum* L.) на нефтезагрязненной почве Республики Татарстан приводило к снижению урожайности зеленой массы растений на 23–59% [49]. Присутствие нефти и дизельного топлива в почве приводило к изменению структуры корневой системы пшеницы и гороха, также влияло на содержание хлорофилла и каротиноидов в листьях бархатцев (*Tagetes erecta* L.) [50]. Кроме этого, по показателям фитотоксичности целесообразно оценивать состояние почвы и содержание нефтяных углеводородов [51].

По усредненному показателю экологического состояния после применения биочара составили ряд устойчивости нефти и нефтепродуктов (по уменьшению устойчивости почвы при внесении биочара), % от контроля: Мазут (86) > Бензин (82) > Нефть (57). Наибольшее восстановление почвы после внесения биочара наблюдали при загрязнении мазутом (86% относительно контроля) и бензина (82% относительно контроля). При этом биочар, внесенный в почву с нефтью за 30 сут эксперимента, восстановил ≈50% физико-химических и биоло-

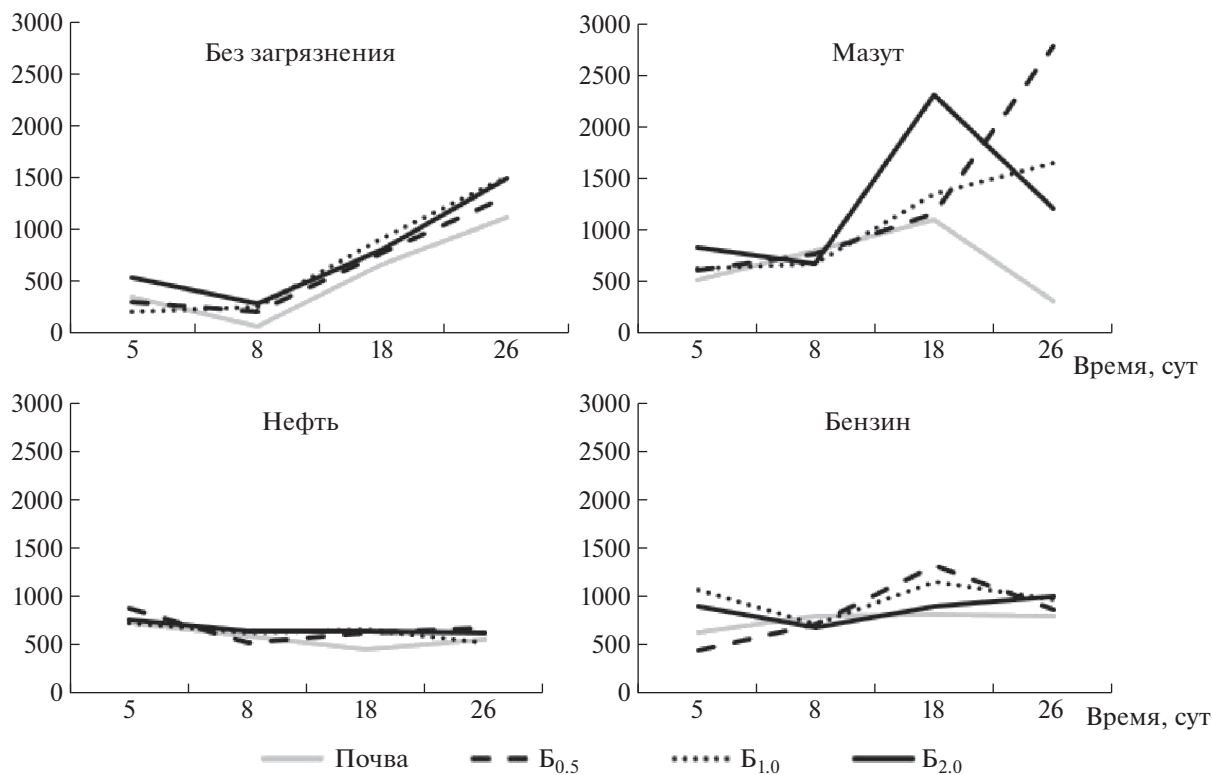


Рис. 3. Изменение эмиссии углекислого газа CO<sub>2</sub> чернозема, загрязненного нефтью, мазутом и бензином после применения биочара.

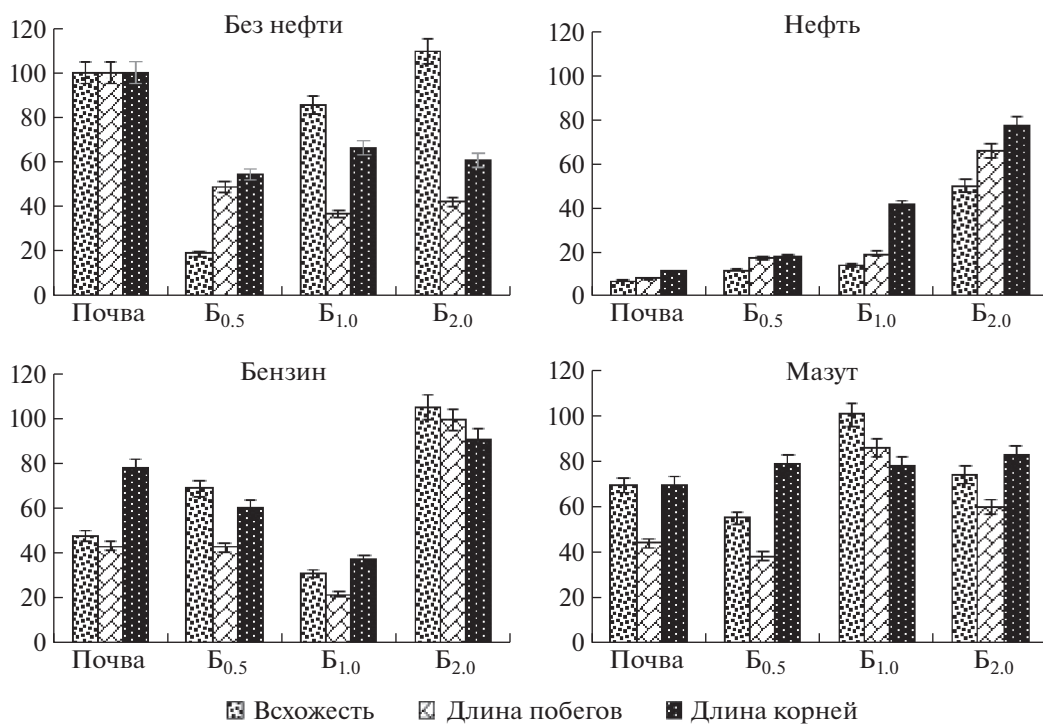


Рис. 4. Изменение фитотоксичности почв (по показателям всхожести, длины побегов и корней тест-растений редиса), загрязненных нефтью, мазутом и бензином после применения биочара.

гических свойств чернозема до уровня незагрязненной почвы (контроля). Для восстановления экологических свойств почвы с нефтью требовался более продолжительный период ремедиации. Степень разложения нефти и нефтепродуктов в почве зависит от многих факторов, в том числе концентрации и вида нефтепродукта, физико-химических и биохимических свойств почвы, вида и концентрации ремедианта, продолжительности ремедиации и других факторов [52–54].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, загрязнение бензином почвы при внесении биочара повышало кислотность почвы (рН), содержание легкорастворимых солей, изменяло величину окислительно-восстановительного потенциала до восстановительного режима. Загрязнение нефтью снижало содержание легкорастворимых солей в почве. Биочар в дозе  $B_{0.5}$  увеличивал интенсивность эмиссии  $CO_2$  в почве с загрязнением мазутом и бензином. При этом длина побегов и корней тест-растений реди-са в почве с нефтью и бензином была простимулирована при внесении дозы  $B_{2.0}$ . Согласно восстановлению экологических показателей почв при загрязнении нефтью, бензином и мазутом, наибольшее воздействие биочар оказывал на свойства почв с мазутом и бензином. Для восстановления экологических свойств почвы с нефтью требовался более продолжительный период ремедиации. Результаты исследования могут быть использованы при прогнозировании и диагностике восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, с помощью показателей экологического состояния.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Гайворонский В.Г., Неведомая Е.Н., Тер-Мисакянц Т.А., Казеев К.Ш. Экологически безопасные концентрации нефти в почвах Черноморского побережья Кавказа // Экол. и пром-ть России. 2021. Т. 25. № 11. С. 61–65. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-11-61-65>
2. Kolesnikov S.I., Gaivoronskii V.G., Rotina E.N., Kazeev K.S., Val'kov V.F. Assessment of soil tolerance toward contamination with black oil in the south of Russia on the basis of soil biological indices: a model experiment // Euras. Soil Sci. 2010. Т. 43. № 8. С. 929–934. <https://doi.org/10.1134/S1064229310080107>
3. Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Denisova T.V. Effect of nitrogen and humic fertilizers on the biochemical state of oil-contaminated chernozem // South of Russia: ecol. develop. 2019. № 14 (2). P. 189–201. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2019-2-189-201>
4. Minnikova T., Kolesnikov S., Minkina T., Mandzhieva S. Assessment of ecological condition of Haplic Chernozem Calcic contaminated with petroleum hydrocarbons during application of bioremediation agents of various natures // Land. 2021. V. 10 (2). № 1–20. P. 169. <https://doi.org/10.3390/land10020169>
5. Наджафова С.И., Кейсерухская Ф.Ш., Гасанова З.П. Самоочищающая способность различных типов почв Азербайджана от нефтяного загрязнения в зависимости от их рН // Агрохимия. 2021. № 3. С. 82–87. <https://doi.org/10.31857/S0002188121040116>
6. Zahed M.A., Salehi S., Madadi R., Hejabi F. Biochar as a sustainable product for remediation of petroleum contaminated soil // Curr. Res. Green Sustain. Chem. 2021. V. 4. Iss. 100055.
7. Autry A.R., Ellis G.M. Bioremediation: an effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil // Environ. Prog. 1992. № 11. P. 318–323.
8. Urum K., Grigson S., Pekdemir T., McMenamy S. A comparison of the efficiency of different surfactants for removal of crude oil from contaminated soils // Chemosphere. 2006. V. 62. P. 1403–1410.
9. Переломов Л.В., Апрощенко Ю.М., Минкина Т.М., Переломова И.В., Бауэр Т.В., Пинский Д.Л. Органоглины – новый класс перспективных сорбентов для ремедиации химически загрязненных объектов окружающей среды // Агрохимия. 2021. № 8. С. 82–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188121080111>
10. Minnikova T., Kolesnikov S., Ruseva A., Kazeev K., Minkina T., Mandzhieva S., Sushkova S. Influence of the biochar on petroleum hydrocarbon degradation intensity and ecological condition of haplic chernozem // Euras. J. Soil Sci. 2022. № 11 (2). P. 157–166. <https://doi.org/10.18393/ejss.1037798>
11. Тихомирова Е.И., Алексахин А.В., Кошелев А.В., Атаманова О.В. Разработка технологических решений и способов получения гумино-минеральных композиций для задач рекультивации нефтезагрязненных территорий // Теор. и прикл. экол. 2020. № 4. С. 203–209. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-4-203-209>
12. Sizmur T., Quilliam R., Puga A.P., Moreno-Jimenez E., Beesley L., Gomez-Eyles J.L. Application of biochar for soil remediation, agricultural and environmental applications of biochar // Adv. Barrier. 2016. V. 63. P. 295–324.
13. Слюсаревский А.В., Зиннатшина Л.В., Васильева Г.К. Сравнительный эколого-экономический анализ методов рекультивации нефтезагрязненных почв путем биорекультивации *in situ* и механической замены грунта // Экол. и пром-ть России. 2018. Т. 22. № 11. С. 40–45. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-11-40-45>
14. Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Столярова Е.А., Логинов О.Н. Эффективность ассоциаций растений семейства бобовых и ростстимулирующих бактерий для восстановления нефтезагрязненных почв // Агрохимия. 2021. № 4. С. 87–96. <https://doi.org/10.31857/S0002188121040074>
15. Ahmad M., Rajapaksha A.U., Lim J.E., Zhang M., Bolan N., Mohan D., Vithanage M., Lee S.S., Ok Y.S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water:



- a review // *Chemosphere*. 2014. V. 99, P. 19–33.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
16. *Amarasingh, H.A.H.I., Gunathilake S.K., Karunathna A.K.* Ascertainment of optimum pyrolysis conditions in producing refuse tea biochar as a soil amendment // *Procedia Food Sci.* 2016. V. 6. P. 97–102.
  17. *Lahori A.H., Guo Z., Zhang Z., Ronghua L., Mahar A., Awasthi M.K., Shen F., Sial T.A., Kumbhar F., Wang P., Jiang S.* Use of Biochar as an amendment for remediation of heavy metal-contaminated soils: Prospects and challenges // *Pedosphere*. 2017. V. 27. P. 991–1014.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60490-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60490-9)
  18. *Anae J., Ahmad N., Kumar V., Thakur Vijay K., Gutierrez T., Yang X., Cai C., Yang Z., Coulon F.* Recent advances in biochar engineering for soil contaminated with complex chemical mixtures: Remediation strategies and future perspectives // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 767. Iss. 144351.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144351>
  19. *Bianco F., Race M., Papirio S., Oleszczuk P., Esposito G.* The addition of biochar as a sustainable strategy for the remediation of PAH contaminated sediments // *Chemosphere*. 2021. V. 263. Iss. 128274.
  20. *Saum L., Jiménez M.B., Crowley D.* Influence of biochar and compost on phytoremediation of oil-contaminated soil // *Inter. J. Phytoremed.* 2018. 20. 1. P. 54–60.  
<https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1337063>
  21. *Yang Y., Ye S., Zhang C., Zeng G., Tan X., Song B., Zhang P., Yang H., Li M., Chen Q.* Application of biochar for the remediation of polluted sediments // *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 15. № 4. Iss. 124052.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124052>
  22. *Novak J.M., Busscher W.J., Laird D.L., Ahmedna M., Watts D.W., Niandou M.A.S.* Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal Plain soil // *Soil Sci.* 2009. V. 174. P. 105–112.  
<https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181981d9a>
  23. *Sohi S.P., Krull E., Lopezcapel E., Bol R.* A review of biochar and its use and function in soil // *Adv. Agron.* 2010. V. 105. P. 47–82.  
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
  24. *Xiao X., Chen B., Chen Z., Zhu L., Schnoor J.L.* Insight into multiple and multilevel structures of biochars and their potential environmental applications: a critical review // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52. P. 5027–5047.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06487>
  25. *Yuan P., Wang J., Pan Y., Shen B., Wu C.* Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 659. P. 473–490.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.400>
  26. *Бойцова Л.В., Рижия Е.Я., Дубовицкая В.И.* Динамика кислотности и емкости катионного обмена дерново-подзолистой супесчаной почвы при внесении биоугля // *Агрохимия*. 2021. № 9. С. 22–29.  
<https://doi.org/10.31857/S0002188121090052>
  27. *Kolesnikov S.I., Gayvoronskiy V.G., Kazeev K.S., Dadenko E.V., Denisova T.V., Tishchenko S.A.* Simulation of ordinary chernozem pollution by heavy oil to determine environmentally safe concentrations // *World Appl. Sci. J.* 2013. V. 25. 9. P. 1339–1342.  
<https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.25.09.13409>
  28. *Вальков В.Ф., Казеев К.Ш., Колесников С.И.* Почвы Юга России. Ростов н/Дону: Изд-во “Эверест”, 2008. 276 с.
  29. *Liu H., Kumar V., Yadav V., Guo S., Sarsaiya S., Binod P., Sindhu R., Xu P., Zhang Z., Pandey A., Kumar Awasthi M.* Bioengineered biochar as smart candidate for resource recovery toward circular bio-economy: a review // *Bioengineered*. 2021. V. 12 (2). P. 10269–10301.  
<https://doi.org/10.1080/21655979.2021.1993536>
  30. *Hoang S.A., Sarkar B., Seshadri B., Lamb D., Wijesekara H., Vithanage M., Liyanage C., Kolivabandara P.A., Rinklebe J., Lam S.S., Vinu A., Wang H., Kirkham M.B., Bolan N.S.* Mitigation of petroleum-hydrocarbon-contaminated hazardous soils using organic amendments: A review // *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 416. Iss. 125702.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125702>
  31. *Wang Y., Li F., Rong X., Song H., Chen J.* Remediation of petroleum-contaminated soil using bulrush straw powder, biochar and nutrients // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2017. V. 98 (5). P. 690–697.  
<https://doi.org/10.1007/s00128-017-2064-z>
  32. *Li X., Li Y., Zhang X., Zhao X., Sun Y., Weng L., Li Y.* Long-term effect of biochar amendment on the biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil microbial fuel cells // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 651. P. 796–806.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.098>
  33. *Dike C.C., Shahsavari E., Surapaneni A., Shah K., Ball A.S.* Can biochar be an effective and reliable biostimulating agent for the remediation of hydrocarbon-contaminated soils? // *Environ Int.* 2021. V. 154. Iss. 106553.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106553>
  34. *Mukome F.N.D., Buelow M.C., Shang J., Peng J., Rodriguez M., Mackay D.M., Pignatello J.J., Sihota N., Hoellen T.P., Parikh S.J.* Biochar amendment as a remediation strategy for surface soils impacted by crude oil // *Environ. Pollut.* 2020. V. 265. Iss. 115006.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115006>
  35. *Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В.* Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2016. 356 с.
  36. ГОСТ 26423-85 “Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки”.
  37. *Савич В.И., Сморгин С.Н., Гукалов В.В., Раскатов В.А., Поляков А.М.* Интегральная оценка окислительно-восстановительного состояния системы почва–растение // *Изв. ТСХА*. 2019. № 4. С. 19–31.  
<https://doi.org/10.34677/0021-342-2019-4-19-31>
  38. *Шигаева Т.Д., Поляк Ю.М., Кудрявцева В.А.* Окислительно-восстановительный потенциал как показатель состояния объектов окружающей среды // *Биосфера*. 2020. 12. № 3. С. 111–124.  
<https://doi.org/10.24855/BIOSFERA.V12I3.549>
  39. *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. V. 362. P. 389–417.
  40. *Savich V., Gukalov V., Sorokin A., Konakh M.* Agroecological evaluation of interrelationships of soil properties in

- time and space // *Dokuchaev Soil Bul.* 2021. P. 163–175. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-106-163-175>
41. *Badía D., Aguirre A.J., Martí C., Márquez M.A.* Sieving effect on the intensity and persistence of soil water repellency: a case study using different soil depths and soil types from NE-Spain // *Catena*. 2013. V. 108. P. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.02.003>
  42. *Doerr S.H.* On standardizing the ‘water drop penetration time’ and the ‘molarity of an ethanol droplet’ techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils // *Earth Surface Proc. Landforms*. 1998. V. 23. P. 663–668.
  43. *Bisdorn E.B.A., Dekker L.W., Schoube J.F.T.* Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure // *Geoderma*. 1993. V. 56. P. 105–118.
  44. *Горбачев В.Н., Бабинцева Р.М.* Экологический мониторинг земель: Учеб. пособ. по экол. мониторингу земель для студентов и аспирантов специальностей “Экология”, “Природопользование”, “Почвоведение”. Ульяновск: УлГУ, 2006. 109 с.
  45. *Судницын И.И., Егоров Ю.В., Бобков А.В., Кириченко А.В.* Влияние структуры почв на их гидрофизические свойства // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2014. Т. 1. С. 14–19.
  46. *Байчоров Р.А.* Действие нефти и нефтепродуктов на свойства почв и продуктивность растений // *E-Scio*. 2020. Т. 2 (41). С. 143–148.
  47. *Кириченко О.А., Иманова Е.Л.* Влияние углеводородов на состав микробного сообщества в луговой глеевой почве // *Вестн. ДО РАН*. 2015. Т. 5 (183). С. 29–34.
  48. *Kondrashina V.S., Strijakova E.R., Zinnatshina L.V.* Influence of activated carbon and other additives on bioremediation rate and characteristics of petroleum-contaminated soils // *Euras. Soil Sci.* 2018. Т. 183. № 4. С. 150. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000234>
  49. *Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zainulgabidinov E.R., Ignatiev Yu.A.* Development of one- and dicotyledic plants on reclaimed oil-contaminated alluvial turf soils // *Bul. Nizhnevartovsk State Univ.* 2022. V. 1 (57). С. 91–101. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/10>
  50. *Киреева Н.А., Григориади А.С., Баширова Р.М., Амирова А.Р.* Использование бархатцев прямостоячих *Tagetes erecta* L. для фиторемедиации почвы, загрязненной нефтяными углеводородами // *Агротехника*. 2012. № 5. С. 66–72.
  51. *Шагидуллин Р.Р., Петров А.М., Иванов Д.В., Тарасов О.Ю., Шагидулина Р.А., Буфатина М.А.* Методические подходы к нормированию содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах // *Экол. и пром-ть России*. 2011. № 6. С. 24–28.
  52. *Бузмаков С.А.* Восстановление земель при различных уровнях загрязнения нефтью // *Зап. Горн. ин-та*. 2013. Т. 203. С. 128–132.
  53. *Петрова Т.А., Рудзиш Э.* Рекультивация техногенно-нарушенных земель с применением осадков сточных вод в качестве мелиорантов // *Зап. Горн. ин-та*. 2021. Т. 251. С. 767–776. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.16>
  54. *Фомичева Н.В., Рабинович Г.Ю., Смирнова Ю.Д., Филонов А.Е.* Новые биосредства для ремедиации нефтезагрязненной почвы // *Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Биол. Экол.* 2020. Т. 31. С. 19–29. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2020.31.19>

## Influence of Biochar on the Ecological State of Ordinary Chernozem under Pollution with Oil, Gasoline and Fuel Oil

T. V. Minnikova<sup>a,\*</sup>, A. S. Ruseva<sup>a</sup>, S. I. Kolesnikov<sup>a</sup>, S.Yu. Revina<sup>a</sup>, and V. G. Gaivoronsky<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Southern Federal University Rostov-on-Don  
ul. B. Sadovaya 105/42, Rostov-on-Don 344006, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: loko261008@yandex.ru*

The work assessed the effect of biochar (B) (charcoal of special treatment) on the ecological state of ordinary chernozem when contaminated with oil, gasoline and fuel oil. To assess the ecological state, pollution of chernozem with oil, gasoline and fuel oil was simulated in the laboratory with subsequent introduction of biochar. The ecological state was assessed by the reaction of the soil environment (pH), the total content of easily soluble salts, changes in redox potential, soil hydrophobicity, CO<sub>2</sub> emissions, phytotoxic parameters of radish test plants. Gasoline in the soil, when applying biochar, increased the alkalinity of the soil, changed the value of the redox potential to the reduction mode. It was found that biochar at a dose of B<sub>0,5</sub> increased the intensity of CO<sub>2</sub> emissions in the soil with fuel oil and gasoline by 41–129%. At the same time, the length of shoots and roots of radish in the soil with oil and gasoline was stimulated only when B<sub>2,0</sub> was applied. Biochar stimulated the ecological properties of soils with fuel oil and gasoline for 30 days of the experiment. The range of resistance of chernozems to the introduction of biochar according to the indicators of the ecological state is as follows: fuel oil (86) > gasoline (82) > oil (57). To restore the ecological properties of the soil with oil, a longer period of remediation is required than 30 days of the experiment.

*Key words:* biochar, petroleum hydrocarbons, biological activity of soils, biodiagnostics.