

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, АГРОХИМИЯ, МЕЛИОРАЦИЯ /
AGRICULTURE, AGROCHEMISTRY, LAND IMPROVEMENT<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.43-51>

УДК 632.122.2

**Влияние нефтяного загрязнения и носителей биопрепарата на агрофизические показатели дерново-подзолистых почв**

© 2020. А. В. Леднев ✉, А. В. Ложкин

ФГБУН «Удмуртский Федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Ижевск, Российская Федерация

В статье представлены результаты влияния различных разрыхлителей-носителей нефтеокисляющего биопрепарата нового поколения на агрофизические показатели дерново-подзолистой почвы, загрязнённой нефтью в сильной степени (до 10 %), и на скорость разложения в ней нефти. Исследования проведены в микрополе в условиях Удмуртской Республики. Установлено, что в течение вегетационного периода 2019 г. все изучаемые носители биопрепарата оказали положительное влияние на эти показатели, однако параметры изменений определялись их видом. Так, внесение в почву опила, ячменной соломы и льняной костры обеспечило повышение коэффициента структурности на 0,83-0,99 ед., или на 35-43 %. Все изучаемые носители биопрепарата статистически достоверно снизили плотность загрязнённой почвы, наибольшее действие на этот показатель оказала костра льняная (на 0,42 г/см³, или на 32 %) и опил (на 0,34 г/см³, или на 26 %). Наиболее значительно увеличило содержание продуктивной влаги в загрязнённой почве внесение вермикулита – на 115 м³/га, или на 50,7 %. Улучшение агрофизических свойств нефтезагрязнённой почвы носителями биопрепарата резко повысило его эффективность по разложению в ней нефти. Наибольшее снижение содержания нефтепродуктов (на 9,9-10,9 мг/кг, или 40,2-44,3 %) оказал биопрепарат в сочетании с кострой льняной, лигнином и соломой. Внесение в загрязнённую почву органоминеральных удобрений также значительно улучшило агрофизические свойства нефтезагрязнённых почв и снизило остаточное содержание в ней нефти на 13,0 мг/кг, или 52,8 %.

Ключевые слова: нефть, рекультивация почв, плотность почвы, коэффициент структурности, продуктивная влага**Благодарности:** работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-416- 180005 p_a.**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Леднев А. В., Ложкин А. В. Влияние нефтяного загрязнения и носителей биопрепарата на агрофизические показатели дерново-подзолистых почв. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(1):43-51. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.43-51>

Поступила: 03.02.2020

Принята к публикации: 14.02.2020

Опубликована онлайн: 28.02.2020

The influence of oil pollution and carriers of biological product on the agrophysical indicators of sod-podzolic soils

© 2020. Andrey V. Lednev ✉, Andrey V. Lozhkin

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russian Federation

The article presents the results of the influence of various aerating agents, carriers of new generation oil-oxidizing biological product on the agrophysical parameters of sod-podzolic soil highly contaminated with oil (up to 10%), and on the rate of oil decomposition in it. The studies were carried out in a microfield experiment in the conditions of the Udmurt Republic. It was established that during the growing season of 2019 all studied carriers of the biological product had positive effect on these indicators, however, the parameters of the changes were determined by their types. Thus, the application of sawdust, barley straw and flax shive into the soil provided an increase in the structural coefficient by 0.83-0.99 units or 35-43 %. All studied carriers of the biological product statistically significantly reduced the density of the contaminated soil, the greatest effect on this indicator was exerted by flax shive (by 0.42 g/cm³ or 32 %) and sawdust (by 0.34 g/cm³ or by 26 %). The application of vermiculite increased the productive moisture content in the contaminated soil most significantly - by 115 m³/ha or by 50.7 %. The improvement of agrophysical properties of oil-contaminated soil by carriers of the biological product increased drastically the effectiveness of the preparation for oil decomposition. The greatest effect on this indicator (by 9.9-10.9 mg/kg or 40.2- 44.3 %) was exerted by the biological product in combination with flax shive, lignin and straw. The application of organomineral fertilizers into the contaminated soil also improved the agrophysical properties of oil-contaminated soils significantly and reduced the residual oil content in it by 13.0 mg/kg or 52.8 %.

Keywords: oil, soil remediation, soil density, structural coefficient, productive moisture**Acknowledgement:** the research was supported by the RFBR grant No. 18-416- 180005 p_a.**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

For citation: Lednev A. V., Lozhkin A. V. The influence of oil pollution and carriers of biological product on the agrophysical indicators of sod-podzolic soils. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(1):43-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.43-51>

Received: 03.02.2020

Accepted for publication: 14.02.2020

Published online: 28.02.2020

Нефтедобывающий комплекс оказывает сильное отрицательное влияние на окружающую среду, в том числе на почвенный покров. Только в 2018 г. по официальной статистике Минэнерго России на предприятиях топливно-энергетического комплекса произошло 13612 порывов трубопроводов, в том числе 8126 нефтепроводов, на поверхность почвы и в водоёмы попало 2269 м³ нефти, загрязнено 7430,8 га земель, общий ущерб от происшедших аварий составил 488,2 млн руб.¹ Сброс чужеродных и, как правило, геохимически активных соединений вызывает трансформацию и последующее разрушение природных систем, вплоть до полной деградации. Необходимость восстановления экологического состояния нарушенных территорий и возвращение земельных участков в хозяйственный оборот требует оперативного устранения последствий нефтяного загрязнения почвенного покрова. Это достигается проведением комплекса работ по их ремедиации, для успешного выполнения которых необходимо иметь объективное представление о процессах, протекающих в загрязнённых нефтью почвах, что придаёт данным исследованиям высокую степень актуальности.

Вопросам оценки действия нефти и нефтепродуктов на свойства почвы, продуктивность растений и разработки приемов восстановления плодородия нефтезагрязнённых почв посвящены многие исследования зарубежных [1, 2, 3, 4, 5] и отечественных [6, 7, 8, 9, 10] ученых. К настоящему времени доказана ведущая роль в разложении нефтепродуктов углеродоокисляющей микрофлоры, разработаны многочисленные биопрепараты, содержащие различные их штаммы. Применение биопрепаратов для разложения нефти достаточно хорошо изученный метод, однако их эффективность определяется не только штаммами микроорганизмов, входящих в их состав, но и применяемым его носителем (разрыхли-

телем почв). Вид носителя-разрыхлителя почв (далее носителя) играет ключевую роль в эффективности биопрепарата, он не только позволяет более равномерно распределять биопрепарат в нефтезагрязнённой почве, но и резко улучшать агрофизические (плотность, пористость и др.) и водно-воздушные (воздухопроницаемость, воздухоёмкость, влагоёмкость и др.) свойства. Кроме этого, в состав носителя можно включить различные элементы минерального питания, регуляторы роста, мелиоративные добавки (известняковую муку, гипс и др.), что позволяет оптимизировать пищевой режим нефтеокисляющей микрофлоры в первый, самый сложный период её адаптации к почвенно-климатическим условиям нефтезагрязнённой почвы.

Данные исследования имеют высокую степень новизны, так как в литературе имеются лишь единичные данные по влиянию носителей биопрепарата на его эффективность по разложению нефтепродуктов [11,12]. В качестве носителя в основном изучали отходы деревопереработки (стружку, опил, хвою и др.) и их применяли только с целью разрыхления загрязнённых почв (улучшения их аэрации). Сведений по изучению других видов носителей биопрепаратов и, тем более, их сравнению между собой в одном опыте в литературе не выявлено.

Цель исследований – установить влияние различных носителей нефтеокисляющих биопрепаратов на основные агрофизические свойства почв, загрязнённых нефтью в сильной степени, для разработки технологии их ремедиации.

Материал и методы. Площадь дерново-подзолистых почв в Удмуртской Республике 68 % [13]. Именно они, в первую очередь, подвергаются интенсивному антропогенному воздействию, в том числе загрязнению нефтепродуктами, что определило их в качестве объекта исследований.

¹Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». М.: Минприроды РФ, 2019. Режим доступа: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2018_/

Из большого количества современных сертифицированных нефтеокисляющих биопрепаратов был выбран биопрепарат нового поколения, разработанный Пермским институтом экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН (ИЭГМ). Данный олеофильный биопрепарат представляет собой совокупность ассоциации микроорганизмов-нефтеразрушителей *Rhodococcus erythropolis* ИЭГМ 708 и *Rhodococcus ruber* ИЭГМ 327 (50,0-80,0 мас. %), биосурфактанта – *Rhodococcus* (5,0-30,0 мас. %) и минеральных солей азота, фосфора и калия (остальное). Основные преимущества данного олеофильного биопрепарата: высокая степень солюбилизации с нефтяными углеводородами, в результате которой бактерии-нефтедеструкторы вступают в непосредственный контакт с загрязнителем; повышение биодоступности нефтяных углеводородов в результате их десорбции с почвенными частицами под действием биосурфактанта; заключенный в олеофильном матриксе комплекс питательных

соединений; высокая биodeградеability; отсутствие токсического воздействия на микрофлору почвы. Биопрепарат характеризуется высокой жизнеспособностью входящих в его состав микроорганизмов, удобен в хранении и при транспортировке [14].

Влияние разных носителей нефтеокисляющего биопрепарата изучали в мелкоделяном полевом опыте в течение вегетационного периода 2019 г.

Микрополевой опыт заложен в мае 2019 г. на опытном поле Удмуртского НИИСХ в Завьяловском районе Удмуртской Республики. Опытный участок расположен на средней части слабопокатого юго-западного склона увала. Угодье – пашня, почва – агродерново-среднеподзолистая слабосмытая среднесуглинистая на покровных глинах и тяжёлых суглинках. Агрохимические показатели почвы до закладки опыта приведены в таблице 1. Они типичны для среднеокультуренных дерново-подзолистых почв.

Таблица 1 – Химические и физико-химические свойства почвы до закладки опыта /
Table 1 – Chemical and physico-chemical properties of soil before trial establishment

Органическое вещество, % / Organic matter, %	pH_{KCl}	Физико-химические показатели, ммоль/100г / Physicochemical indicators, mmol/100g		Химические показатели, мг/кг / Chemical indicators, mg/kg			
		H_2	S	P_2O_5	K_2O	$N-NH_4$	$N-NO_3$
1,8	5,3	2,31	15,5	170	80	16	10

Схема полевого опыта включала 10 вариантов: абсолютный контроль (без нефти) и 9 вариантов загрязнённых товарной нефтью до 10 вес. % от массы абс. сухой почвы. В 6 вариантах изучались различные виды носителей биопрепарата: опил, низинный торф, ячменная солома, вермикулит, костра льняная и лигнин. Количество внесённых носителей соответствовало 1/8 части от общего объёма загрязнённого пахотного горизонта.

Биопрепарат был внесён два раза: первый – в составе носителя (20 июня), второй – с помощью опрыскивателя на поверхность почвы (23 июля). В варианте без носителя биопрепарат вносили в эти же сроки. Он был разлит с помощью опрыскивателя на поверхность почвы. В каждом варианте было внесено по 3 литра биопрепарата.

Почва в опыте три раза перекапывалась на глубину 0-20 см (один раз для перемешива-

ния нефти с почвой и два раза для перемешивания биопрепарата). В качестве контрольных вариантов сравнения взята нефтезагрязнённая почва без биопрепарата (контроль 1), нефтезагрязнённая почва с биопрепаратом, но без носителя (контроль 2) и нефтезагрязнённая почва, где в качестве способа ремедиации выбрана органоминеральная система удобрения, которая проявила наиболее высокую эффективность при более низких уровнях загрязнения почвы нефтью (контроль 3) [10].

Размер делянок 1,0×1,0 м. Делянки между собой отделены двойной полиэтиленовой плёнкой на глубину 30 см. Опыт заложен в 4-кратной повторности. Размещение делянок систематическое со смещением, в 2 яруса.

Почвенные образцы отобраны 21 июля и 21 сентября 2019 года и проанализированы в биохимической лаборатории Удмуртского НИИСХ гостированными методиками,

содержание нефтепродуктов определено по ПНД Ф 16.1:2.2.22-98², плотность почвы – буровым методом, структура почвы – методом сухого просеивания³. Статистическая обработка данных проведена методом дисперсионного анализа⁴.

Результаты и их обсуждение. Как уже говорилось, одной из главных функций носителей биопрепаратов является улучшение агрофизических свойств загрязнённых почв. В числе агрофизических свойств особо важное значение имеет структура почвы, то есть её способность агрегатироваться и распадаться на относительно устойчивые отдельности.

Структура во многом определяет водно-воздушный и тепловой режимы почв.

Одним из показателей структурного состояния почв является коэффициент структурности, который определяется отношением массы агрегатов 10,0...0,25 мм к сумме агрегатов > 10 мм и < 0,25 мм. В условиях полевого опыта доза нефтяного загрязнения 10% оказала небольшое оструктурирующее действие, склеивая частицы пылеватой фракции между собой, что привело к повышению коэффициента структурности (K_c) на 0,05 ед. Однако это отмеченное изменение происходило только на уровне положительной тенденции (табл. 2).

Таблица 2 – Влияние биопрепарата и его носителей на изменение структурного состояния нефтезагрязнённой почвы (21.07.2019) /

Table 2 – The effect of the biological product and its carriers on change in the structural state of oil-contaminated soil (21.07.2019)

Вариант / Variant	Размер агрегатов (мм) и их содержание (% от массы воздушно-сухой почвы) / Unit size (mm) and their contents (% of weight of air-dry soil)										K_c / structural coef- ficient
	>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25<	0,25-10	
Без нефти (абс. контроль) / Oil free (absolute control)	22,0	7,0	8,5	16,1	10,5	17,1	3,1	7,1	8,6	69,4	2,27
Нефть 10% (контроль 1) / Oil 10% (control 1)	22,2	6,8	8,6	16,6	10,5	17,0	3,2	7,2	7,9	69,9	2,32
Нефть + биопрепарат (фон) (контроль 2) / Oil + biopreparation (background) (control 2)	21,9	7,2	9,4	17	10,5	17,7	3	7,8	5,5	72,6	2,65
Фон + опил / Background + sawdust	18,4	8	9,7	19,7	12,2	17	3	6,8	5,2	76,4	3,24
Фон + торф / Background + peat	22,6	8,6	9,1	17,6	10,3	17,8	3,3	6,8	3,9	73,5	2,77
Фон + солома / Background + straw	19,3	8,4	9,7	18,5	11,5	18,4	3,6	6,7	3,9	76,8	3,31
Фон + вермикулит / Background + vermiculite	25,1	7,5	9,6	16,1	9,8	18,5	2,7	6,3	4,4	70,5	2,39
Фон + костра / Background + flax shive	18,0	7,6	10,8	19,2	9,8	15,9	4,1	8,5	6,1	75,9	3,15
Фон + лигнин / Background + lignin	22,8	7,9	8,3	15,9	10,6	19	3	7,3	5,2	72,0	2,57
Нефть + $N_{30}P_{30}K_{30}$ + на- воз 30 т/га (контроль 3) / Oil + $N_{30}P_{30}K_{30}$ + manure 30 tons/hectare (control 3)	19,9	7,9	9,4	17,8	12,3	17,2	2,5	5,3	7,7	72,4	2,62
HCP ₀₅ / LSD ₀₅											0,82

²ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органометаллических, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. Утв. 10.11.1998 Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. 18 с. Режим доступа: https://standartgost.ru/g/%D0%9F%D0%9D%D0%94_%D0%A4_16.1:2.2.22-98

³Вадюнина Л.Н. Корчагина Л.Н. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат; 1986. 416 с.

⁴Доспехов В.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

По литературным данным [7, 15, 16] и результатам предыдущих исследований [10], нефтяное загрязнение оказывает неоднозначное действие на этот показатель. С одной стороны, оно способствует повышению агрегатированности, вызывая слипание почвенных частиц и агрегатов мелких фракций между собой. За счет этого уменьшается на 10...50 % содержание фракции < 0,25 мм [7, 10]. С другой стороны, при высоких уровнях загрязнения нефтью наблюдается слипание более крупных агрегатов между собой, что вызывает значительное увеличение глыбистой фракции [15]. Этим объясняется, что в одних случаях после нефтяного загрязнения наблюдается уменьшение коэффициента структурности в почве [7, 15], а в других случаях – его увеличение [10, 16].

По данным микрополевого опыта, внесение биопрепарата обусловило повышение этого коэффициента по сравнению с контролем 1 – на 0,38 ед., но оно также наблюдалось только на уровне положительной тенденции.

Использование носителей биопрепарата, в большинстве случаев, способствовало зна-

чительному улучшению структуры почвы. Статистически достоверное повышение K_c обеспечило внесение в почву опила, соломы и льняной костры (повышение на 0,83-0,99 ед., или на 35-43 %).

Другим важнейшим агрофизическим показателем почв, определяющим её водно-воздушные свойства, является плотность почвы. Проведёнными исследованиями установлено, что нефтяное загрязнение и внесение одного биопрепарата (без носителей) обусловило уменьшение этого показателя соответственно на 0,03 и 0,07 г/см³, однако оно статистически не доказывалось и проявлялось только на уровне тенденции (табл. 3). Это связано с тем, что, во-первых, нефть способствует некоторому улучшению структуры почвы, во-вторых, она сама имеет низкую плотность – 0,830-0,926 г/см³. Внесение всех изучаемых носителей биопрепарата резко и статистически достоверно снизило плотность загрязнённой почвы, наиболее действие на этот показатель оказала костра льняная (на 0,42 г/см³, или на 32 %) и опил (на 0,34 г/см³, или на 26 %).

Таблица 3 – Влияние биопрепарата и его носителей на изменение плотности и влажности нефтезагрязнённой почвы (21.07.2019) /

Table 3 – The effect of the biological product and its carriers on the change in the density and moisture of oil-contaminated soil (21.07.2019)

Вариант / Variant	Плотность почвы, г/см ³ / Soil density, g/cm ³		Полевая влажность, % / Soil moisture, %		Продуктивная влага, м ³ /га / Productive moisture, m ³ /ha	
	значе- ние / value	отклоне- ние, ± / deviation, ±	значе- ние / value	отклоне- ние, ± / deviation, ±	значение / value	отклоне- ние, ± / deviation, ±
Без нефти (абс. контроль) / Oil free (absolute control)	1,30	-	10,85	-	227	-
Нефть 10 % (контроль 1) / Oil 10% (control 1)	1,27	-0,03	9,08	-1,78	178	-49
Нефть + биопрепарат (фон) (контроль 2) / Oil + biopreparati- on (background) (control 2)	1,23	-0,07	9,23	-1,63	179	-48
Фон + опил / Background + sawdust	0,95	-0,34	17,95	7,10	296	69
Фон + торф / Background + peat	1,05	-0,25	18,35	7,50	287	60
Фон + солома / Background + straw	1,11	-0,19	13,08	2,23	243	16
Фон + вермикулит / Background + vermiculite	1,08	-0,22	18,50	7,65	342	115
Фон + костра / Background + flax shive	0,88	-0,42	17,23	6,38	267	40
Фон + лигнин / Background + lignin	1,14	-0,15	14,88	4,03	228	1
Нефть+N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ +навоз 30 т/га (контроль 3) / Oil + N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + manure 30 tons/hectare (control 3)	1,01	-0,29	16,28	5,43	278	51
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	0,08	-	4,63	-	-

Нефтяное загрязнение способствовало снижению полевой влажности на 1,78 % и, как следствие, запасов продуктивной влаги на 49 м³/га. Это связано с двумя причинами. Во-первых, нефть резко увеличивает водопропрочность агрегатов, коэффициент водопропрочности достигает 0,7-1,0 [7, 10, 15]. Появление этого свойства обусловлено гидрофобностью агрегатов загрязненных почв и поэтому не является положительным изменением, образуется так называемая «псевдowodopропрочность». В результате её появления воде очень сложно проникнуть в почвенные агрегаты, и поэтому она не впитывается в почву, а стекает по её поверхности или просачивается в нижние горизонты по крупным порам. Второй причиной снижения влагоёмкости почвы является закупорка нефтепродуктами макро- и микропор в почвенной толще, в результате чего общая порозность загрязнённой почвы снижается на 24-28 и более процентов [10, 15].

Внесением в загрязнённую почву носителей биопрепарата удалось не только достичь по запасам продуктивной влаги показателя абсолютного контроля (варианта с незагрязнённой почвой), но и значительно его превысить. Наибольшее действие на продуктивную влагу оказало внесение в почву вермикулита (увеличение на 115 м³/га, или на 50,7 %).

Таблица 4 – Влияние биопрепарата и его носителей на содержание нефтепродуктов в нефтезагрязнённой почве, г/кг /

Table 4 – Effect of the biological product and its carriers on the content of oil products in oil-contaminated soil, g/kg

Вариант / Variant	21.07.2019 г.			21.09.2019 г.		
	значение / value	отклонение, ± / deviation, ±		значение / value	отклонение, ± / deviation, ±	
		г/кг / g/kg	%		г/кг / g/kg	%
Без нефти (абс. контроль) / Oil free (absolute control)	0,1	-	-	0,1	-	-
Нефть 10 % (контроль 1) / Oil 10% (control 1)	77,7	-	-	24,6	-	-
Нефть + биопрепарат (фон) (контроль 2) / Oil + biopreparation (background) (control 2)	71,6	-6,1	-7,9	19,1	-5,5	-22,4
Фон + опил / Background + sawdust	62,9	-14,8	-19,0	18,4	-6,2	-25,2
Фон + торф / Background + peat	66,2	-11,5	-14,8	20,7	-3,9	-15,9
Фон + солома / Background + straw	62,3	-15,4	-19,8	14,7	-9,9	-40,2
Фон + вермикулит / Background + vermiculite	49,7	-28,0	-36,0	16,6	-8,0	-32,5
Фон + костра / Background + flax shive	32,7	-45,0	-57,9	14,0	-10,6	-43,1
Фон + лигнин / Background + lignin	63,4	-14,3	-18,4	13,7	-10,9	-44,3
Нефть + N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + навоз 30т/га (контроль 3) / Oil + N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ + manure 30 tons / hectare (control 3)	52,6	-25,1	-32,3	11,6	-13,0	-52,8
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	6,0	7,7	-	5,2	21,1

Необходимо отметить положительное действие на агрофизические показатели нефтезагрязнённой почвы внесения органоминеральных удобрений, они снизили плотность почвы на 0,29 г/см³, или на 22,3 % и увеличили запасы продуктивной влаги на 51 м³/га, или на 22,4 %.

Наибольшее внимание в данном опыте было обращено на действие биопрепарата и его носителей на снижение содержания в загрязнённой почве нефтепродуктов, так как именно по этому показателю определяют эффективность ремедиации почв, загрязнённых нефтью. Необходимо отметить, что даже без внесения биопрепарата в контрольном варианте за два месяца (с 21.07.2020 по 21.09.2020) произошло снижение содержания нефтепродуктов на 53,1 мг/кг, или на 68,3 %, что свидетельствует о достаточно высокой способности дерново-подзолистых почв южной тайги к процессу самовосстановления (табл. 4). Внесением одного биопрепарата удалось снизить содержание нефти на 5,5-6,1 мг/кг, или на 7,9-22,4 %. При совместном внесении биопрепарата с носителями-разрыхлителями его эффективность значительно возрастала. Наиболее значительно снизило содержание нефти в почве внесение биопрепарата с кострой льняной, лигнином и ячменной соломой – на 9,9-10,9 мг/кг, или 40,2-44,3 %.

Очень высокую эффективность обеспечило внесение в загрязнённую почву органоминеральных удобрений, они обусловили дополнительное снижение остаточного содержания в ней нефти по сравнению с контролем на 13,0 мг/кг, или 52,8 %.

Выводы. 1. Использование носителей биопрепарата, в большинстве случаев, способствовало значительному улучшению структуры нефтезагрязнённой почвы. Статистически достоверное повышение коэффициента структурности обеспечило внесение в почву опила, соломы и льняной костры (повышение на 0,83-0,99 ед., или на 35-43 %).

2. Внесение всех изучаемых носителей биопрепарата резко и статистически достоверно снизило плотность загрязнённой почвы, наибольшее действие на этот показатель оказала костра льняная (на 0,42 г/см³, или на 32 %) и опил (на 0,34 г/см³, или на 26 %).

3. Установлено, что все изучаемые носители значительно увеличили влагоёмкость загрязнённой почвы. Самое большее действие на содержание продуктивной влаги оказало внесение в почву вермикулита (увеличение на 115 м³/га, или на 50,7 %).

4. Относительно низкое содержание нефти в загрязнённой почве наблюдалось при совместном внесении биопрепарата с носителями-разрыхлителями. Значительно снизило этот показатель внесение биопрепарата с кострой льняной, лигнином и ячменной соломой – на 9,9-10,9 мг/кг, или 40,2-44,3 %.

5. Внесение в загрязнённую почву органоминеральных удобрений обусловило статистически достоверное улучшение агрофизических свойств нефтезагрязнённых почв и снижение остаточного содержания в ней нефти по сравнению с контролем на 13,0 мг/кг, или 52,8 %.

Список литературы

1. Bramley-Alves J., Wasley J., King C. K. Phytoremediation of hydrocarbon contaminants in subantarctic soils: an effective management option *Environ. Manage.* 2014;142:60-69. URL: https://www.researchgate.net/publication/262419225_Phytoremediation_of_hydrocarbon_contaminants_in_subantarctic_soils_An_effective_management_option
2. Nwankwegu A. S., Anaukwu C. G., Onwosi C. O., Azi F., Azumini P. Use of rice husk as bulking agent in bioremediation of automobile gas oil impinged agricultural soil. *Soil and Sediment Contamination*. 2017; 26(1):96-114. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2017.1245711>
3. Polyak Y. M., Bakina L. G., Chugunova M. V. Effect of remediation strategies on biological activity of oilcontaminated soil – A field study. *Int. Biodet. Biodeg.* 2018;126:57-68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.004>
4. Rusin M., Gospodarek J., Nadgorska-Socha A. The effect of petroleum-derived substances on the growth and chemical composition of Vicia Faba L. *Polish journal of environmental studies*. 2015;24(5):2157-2166. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/41378>
5. Ebadi A., Khoshkholgh Sima N. A., Hashemi M., Olamaee M., Ghorbani Nasrabadi R. Remediation of saline soil contaminated with crude oil using the Halophyte *Salicornia Persica* in conjunction with hydrocarbon-degrading bacteria. *Journal of environmental management*. 2018;219:260-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.115>
6. Солнцева Н. П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 376 с.
7. Гилязов М. Ю., Гайсин И. А. Агроэкологическая характеристика и приемы рекультивации нефтезагрязненных черноземов Республики Татарстан. Казань: Фэн, 2003. 228 с.
8. Вершинин А. А., Петров А. М., Акайкин Д. В., Игнатъев Ю. А. Оценка биологической активности дерново-подзолистых почв разного гранулометрического состава в условиях нефтяного загрязнения. *Почвоведение*. 2014; (2): 250-256. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21092644>
9. Пиковский Ю. И., Коротков Л. А., Смирнова М. А., Ковач Р. Г. Лабораторно-аналитические методы при определении углеводородного состояния почв. *Почвоведение*. 2017;(10):1165-1178. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17100070>
10. Леднёв А. В. Изменение свойств почв европейской части Нечерноземной зоны РФ под действием продуктов нефтедобычи и приемы их ремедиации. Ижевск: Цифра, 2018. 229 с.
11. Куюкина М. С., Ившина И. Б., Серебренникова М. К. Оптимизация процесса иммобилизации клеток алканотрофных родококков на хвойных опилках в условиях колоночного биореактора. *Вестник Пермского университета. Серия «Биология»*. 2010;(1):69-72. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17024553>
12. Куюкина М. С., Ившина И. Б., Осипенко М. А., Няшин Ю. И., Тюленёва А. Н., Серебренникова М. К., Криворучко А. В. Кинетическая модель процесса иммобилизации бактериальных клеток на твер-

дом носителя. Российский журнал биомеханики. 2007;11(2):79-87. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11732564>

13. Ковриго В. П. Почвы Удмуртской Республики. Ижевск: РИО Ижевская ГСХА, 2004. 490 с.

14. Куюкина М. С., Ившина И. Б. Олеофильный биопрепарат, используемый для очистки нефтезагрязнённой почвы: пат. № 2180276 Российская Федерация. № 2001104629/13: заяв. 19.02.2001; опубл. 10.03.2002. 10 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37880767>

15. Сулейманов Р. Р., Габбасова И. М., Ситдииков Р. Н. Изменение свойств нефтезагрязнённой серой лесной почвы в процессе биологической рекультивации. Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2005;(1):109-115.

16. Габбасова И. М., Хазиев Ф. Х., Сулейманов Р. Р. Оценка состояния почв с давними сроками загрязнения сырой нефтью после биологической рекультивации. Почвоведение. 2002;(10):1259-1273.

References

1. Bramley-Alves J., Wasley J., King C. K. Phytoremediation of hydrocarbon contaminants in subantarctic soils: an effective management option Environ. Manage. 2014;142:60-69. URL: https://www.researchgate.net/publication/262419225_Phytoremediation_of_hydrocarbon_contaminants_in_subantarctic_soils_An_effective_management_option

2. Nwankwegu A. S., Anaukwu C. G., Onwosi C. O., Azi F., Azumini P. Use of rice husk as bulking agent in bioremediation of automobile gas oil impinged agricultural soil. Soil and Sediment Contamination. 2017; 26(1):96-114. DOI: <https://doi.org/10.1080/15320383.2017.1245711>

3. Polyak Y. M., Bakina L. G., Chugunova M. V. Effect of remediation strategies on biological activity of oilcontaminated soil – A field study. Int. Biodet. Biodeg. 2018;126:57-68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.10.004>

4. Rusin M., Gospodarek J., Nadgorska-Socha A. The effect of petroleum-derived substances on the growth and chemical composition of Vicia Faba L. Polish journal of environmental studies. 2015;24(5):2157-2166. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/41378>

5. Ebadi A., Khoshkholgh Sima N. A., Hashemi M., Olamaee M., Ghorbani Nasrabadi R. Remediation of saline soil contaminated with crude oil using the Halophyte Salicornia Persica in conjunction with hydrocarbon-degrading bacteria. Journal of environmental management. 2018;219:260-268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.115>

6. Solntseva N. P. *Dobycha nefi i geokhimiya prirodnikh landshaftov*. [Oil production and geochemistry of natural landscapes]. Moscow: Izd-vo MGU, 1998. 376 p.

7. Gilyazov M. Yu., Gaysin I. A. *Agroekologicheskaya kharakteristika i priemy rekul'tivatsii neftezagryaznennykh chernozemov Respubliki Tatarstan*. [Agroecological characteristics and methods of reclamation of oil-contaminated chernozems of the Republic of Tatarstan]. Kazan': Fen, 2003. 228 p.

8. Vershinin A. A., Petrov A. M., Akaykin D. V., Ignat'ev Yu. A. *Otsenka biologicheskoy aktivnosti dernovo-podzolistykh pochv raznogo granulometricheskogo sostava v usloviyakh neftyanogo zagryazneniya*. [Assessment of the biological activity of sod-podzolic soils of different particle size distribution under oil pollution]. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2014; (2): 250-256. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21092644>

9. Pikovskiy Yu. I., Korotkov L. A., Smirnova M. A., Kovach R. G. *Laboratorno-analiticheskie metody pri opredelenii uglevodorodnogo sostoyaniya pochv*. [Laboratory and analytical methods for determining the hydrocarbon state of soils]. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2017;(10):1165-1178. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X17100070>, URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30060591>

10. Lednev A. V. *Izmenenie svoystv pochv evropeyskoy chasti Necher-nozemnoy zony RF pod deystviem produktov neftedobychi i priemy ikh remediatsii*. [Change in soil properties in the European part of the Non-Black Earth Zone of the Russian Federation under the influence of oil production products and methods of their remediation]. Izhevsk: Tsifra, 2018. 229 p.

11. Kuyukina M. S., Ivshina I. B., Serebrennikova M. K. *Optimizatsiya protsessa immobilizatsii kletok alkanotrofnikh rodokokkov na khvoynykh opilkakh v usloviyakh kolonochnogo bioreaktora*. [Optimization of the immobilization process for alkanotrophic rhodococci on sawdustcarrier in the column bioreactor]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya* = Bulletin of Perm University. Biology. 2010;(1):69-72. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17024553>

12. Kuyukina M. S., Ivshina I. B., Osipenko M. A., Nyashin Yu. I., Tyu-leneva A. N., Serebrennikova M. K., Krivoruchko A. V. *Kineticheskaya model' protsessa immobilizatsii bakterial'nykh kletok na tverdom nositele*. [A kinetic model of bacterial cell immobilization process on the solid carrier]. *Rossiyskiy zhurnal biomekhaniki* = Russian Journal of Biomechanics. 2007;11(2):79-87. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11732564>

13. Kovriго V. P. *Pochvy Udmurtskoy Respubliki*. [Soils of the Udmurt Republic]. Izhevsk: RIO Izhevskaya GSKhA, 2004. 490 p.

14. Kuyukina M. S., Ivshina I. B. Oleophilic biological preparation useful for cleaning oil-polluted soil: patent RF no. 2180276, 2002. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37880767>

15. Suleymanov R. R., Gabbasova I. M., Sitdikov R. N. *Izmenenie svoystv neftezagryaznennoy seroy lesnoy pochvy v protsesse biologicheskoy rekul'tivatsii*. [Change in the properties of oil-contaminated sulfur forest soil in the process of biological reclamation]. *Izvestiya rossiyской akademii nauk. Seriya biologicheskaya*. 2005;(1):109-115 (In Russ.).

16. Gabbasova I. M., Khaziev F. Kh., Suleymanov R. R. *Otsenka sostoyaniya pochv s davnimi srokami zagryazneniya syroy nef'tyu posle biologicheskoy rekul'tivatsii*. [Assessment of the condition of soils with long periods of contamination with crude oil after biological reclamation]. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2002;(10):1259-1273. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ **Леднев Андрей Викторович**, доктор с.-х. наук, руководитель Удмуртского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала ФГБУН «Удмуртский Федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Ленина 1, с. Первомайский, Завьяловского района, Российская Федерация, 427007, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-768x>**, e-mail: av-lednev@yandex.ru

Ложкин Андрей Владимирович, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник управления НИР Удмуртского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала ФГБУН «Удмуртский Федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Ленина 1, с. Первомайский, Завьяловского района, Российская Федерация, 427007, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9654-7462>**, e-mail: lozhkin127@gmail.com

Information about the authors

✉ **Andrey V. Lednev**, DSc in Agricultural Science, head of the Udmurt Scientific Research Institute of Agriculture - Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», st. Lenin 1, v. Pervomaisky, Zavyalovsky district, Russian Federation, 427007, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8602-768x>**, e-mail: av-lednev@yandex.ru

Andrey V. Lozhkin, PhD in Agricultural Science, senior researcher of the Research Department, Udmurt Scientific Research Institute of Agriculture - Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», st. Lenin 1, v. Pervomaisky, Zavyalovsky district, Russian Federation, 427007, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9654-7462>**, e-mail: lozhkin127@gmail.com

✉ – Для контактов / Corresponding author