



# ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

<http://ecobiotech-journal.ru>


## ФИТОРЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВЫ, КОМПЛЕКСНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕФТЬЮ И ГЕРБИЦИДАМИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТЕНИЙ ОВСА И ЛЮПИНА

Кузина Е.В.\*, Мухаматдырова С.Р.,  
Искужина М.Г., Кульбаева Л.А.,  
Коршунова Т.Ю.

Уфимский Институт биологии Уфимского федерального  
исследовательского центра РАН, Уфа, Россия  
\*E-mail: [lab.biotech@yandex.ru](mailto:lab.biotech@yandex.ru)

Изучена возможность использования растений овса посевного (*Avena sativa* L.) и люпина белого (*Lupinus albus* L.) в качестве фиторемедиантов почв, загрязненных нефтью и/или гербицидами Тапир (класс имидазолиноны) и Спецназ 750 (класс сульфонилмочевины). Тапир оказался токсичнее для растений обоих видов, чем нефть или Спецназ 750. Присутствие Тапира в почве в количестве 20.0 мкл/кг приводило к уменьшению длины корней растений на 42.4-71.9%, побегов – на 28.9-71.9%. Показано, что нефть (2 % масс.) нивелировала стрессовое влияние гербицидов на почвенную микробиоту и растения. Через 21 день эксперимента токсичность почвы значительно снизилась при выращивании растений на почве с нефтью и нефтью со Спецназом 750. В почве, загрязненной гербицидом Тапир, при использовании обоих растений фитотоксичность осталась на прежнем уровне.

**Ключевые слова:** овес ♦ люпин ♦ контаминация почвы  
♦ фиторемедиация ♦ стрессоустойчивость растений

Поступила в редакцию: 06.09.2024

[Цитировать | Cite as](#)

[DOI: 10.31163/2618-964X-2024-7-3-176-181](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2024-7-3-176-181)

[EDN: VBHXRV](#)

## ВВЕДЕНИЕ

Рекультивацию с использованием растений можно считать одной из самых экономически эффективных и экологически чистых технологий. Спектр загрязняющих веществ, утилизируемых посредством фиторемедиации включает многочисленные органические и неорганические поллютанты [Panchenko et al., 2023]. Растения обладают различными механизмами удаления или разложения ксенобиотиков: деградация может происходить непосредственно в тканях растений, но большинство процессов осуществляется в ризосфере в результате взаимодействия корневых экссудатов и микроорганизмов [Yavari et al., 2015]. В связи с тем, что, как правило, контаминация почвы происходит одновременно

## PHYTOREMEDIATION OF SOIL COMPREHENSIVELY CONTAMINATED WITH OIL AND HERBICIDES USING OAT AND LUPIN PLANTS

Kuzina E.V.\*, Mukhamatdyarova S.R.,  
Iskuzhina M.G., Kulbaeva L.A.,  
Korshunova T.Y.

Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of the  
Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia  
\*E-mail: [lab.biotech@yandex.ru](mailto:lab.biotech@yandex.ru)

The possibility of using oat plants (*Avena sativa* L.) and white lupine (*Lupinus albus* L.) as phytoremediants of soils contaminated with oil and/or herbicides Tapir (imidazolinone class) and Spetsnaz 750 (sulfonylurea class). Tapir turned out to be more toxic to plants of both species than oil or Spetsnaz 750. The presence of Tapir in the soil in the amount of 20.0 µl/kg led to a decrease in the length of plant roots by 42.4-71.9%, shoots – by 28.9-71.9%. It was shown that oil (2% by weight) leveled the stress effect of herbicides on soil microbiota and plants. After 21 days of the experiment, soil toxicity decreased most significantly when growing plants on soil with oil and oil with Spetsnaz 750. In soil contaminated with Tapir, phytotoxicity remained at the same level when using both plants.

**Keywords:** oats ♦ lupin ♦ soil contamination ♦  
phytoremediation ♦ stress resistance of plants

Принято в печать: 03.10.2024



несколькими типами загрязнителей, совокупность данных веществ может оказывать как подавляющее, так и стимулирующее воздействие на эффективность рекультивации [Ye et al., 2017; Chirakkara et al., 2016]. Одним из перспективных направлений исследований в данной области является изучение фиторемедиации полизагрязненных почв, которые в течение длительного времени находились в сельскохозяйственном использовании. По данным литературы список фиторемедиантов, пригодных для восстановления почв, подвергшихся комплексному загрязнению, в том числе гербицидами, достаточно ограничен [Mamirova et al., 2022; Tarla et al., 2020], что обуславливает необходимость поиска растений, толерантных к присутствию в почве данных ксенобиотиков. В настоящей работе исследована способность растений овса и люпина к снижению токсичности почвы, искусственно загрязненной нефтью и/или гербицидами.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования были выбраны растения: овес посевной (*Avena sativa* L.) сорта Рысак и люпин белый (*Lupinus albus* L.) сорта Дега, у которых ранее была выявлена устойчивость к присутствию в почве нефти и гербицидов [Коршунова и др., 2023]. В лабораторном эксперименте использовали чернозем оподзоленный, отобранный из верхнего горизонта почвы (0-20 см) с территории Бурзянского района Республики Башкортостан. В пластиковые сосуды вносили 400 г почвенно-песчаной смеси (9:1), загрязненной нефтью в количестве 20 г/кг почвы. Дозы внесения гербицидов были увеличены в 2 раза по сравнению с рекомендациями производителя: Тапир (д.в. имазетапир) – 20.0 мкл/кг почвы, Спецназ 750 (далее Спецназ) (д.в. трибенурон-метил) – 0.5 мг/кг почвы. Растения выращивали в течение трех недель при комнатной температуре (22-24°C) в условиях светоплощадки при интенсивности светового потока 240 мкмоль м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ФАР, 14-часовом фотопериоде. Влажность почвы поддерживали на уровне 60% от полной влагоемкости.

Суммарное содержание хлорофиллов а и b в листьях растений определяли с помощью прибора DUALEX SCIENTIFIC+ (FORCE-A, France) согласно рекомендациям производителя, содержание малонового диальдегида (МДА) – по методу Коста [Costa et al., 2002]. Измерения проводили в трех биологических и трех аналитических повторностях. Численность микроорганизмов в почве анализировали методом последовательных разведений. Количество гетеротрофных микроорганизмов учитывали путем посева на мясопептонный агар, бактерий, разлагающих нефть – на агар Раймонда с дизельным топливом, олигонитрофильных микроорганизмов – на среду Эшби, микромицетов – на среду Чапека [Дзержинская, 2008; Raymond, 1961]. После окончания эксперимента измеряли морфометрические показатели растений (длину побегов и корней). Фитотоксичность почвы оценивали методом почвенных пластинок по степени ингибирования прорастания семян редиса (*Raphanus sativus* L.) сорта Розово-красный с белым кончиком.

Статистическую обработку осуществляли с применением стандартных программ MS Excel.

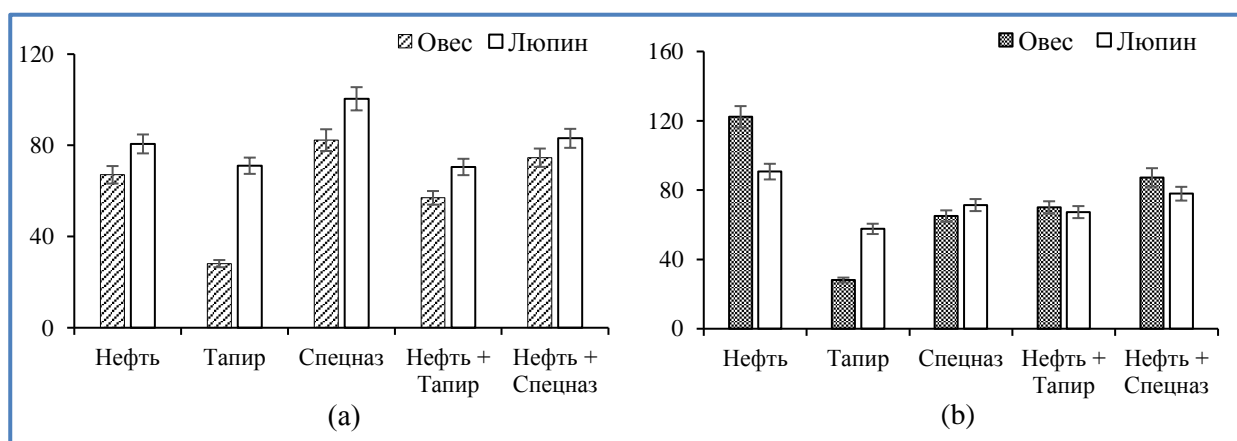
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всхожесть растений люпина во всех вариантах опыта была одинаковой, в случае с овсом: загрязнение почвы Тапиром и Тапиром с нефтью не повлияло на его всхожесть, в присутствии нефти, Спецназа и Спецназа с нефтью – всхожесть овса уменьшилась на 6.7-13.3%.

Через семь дней опыта высота растений, развивавшихся в условиях загрязнения, была значительно ниже по сравнению с контрольными растениями, росшими на чистой почве. Тапир оказался токсичнее для растений обоих видов, чем нефть и Спецназ. В присутствии данного гербицида длина растений овса уменьшилась на 36.0%, люпина – на 12.9%.

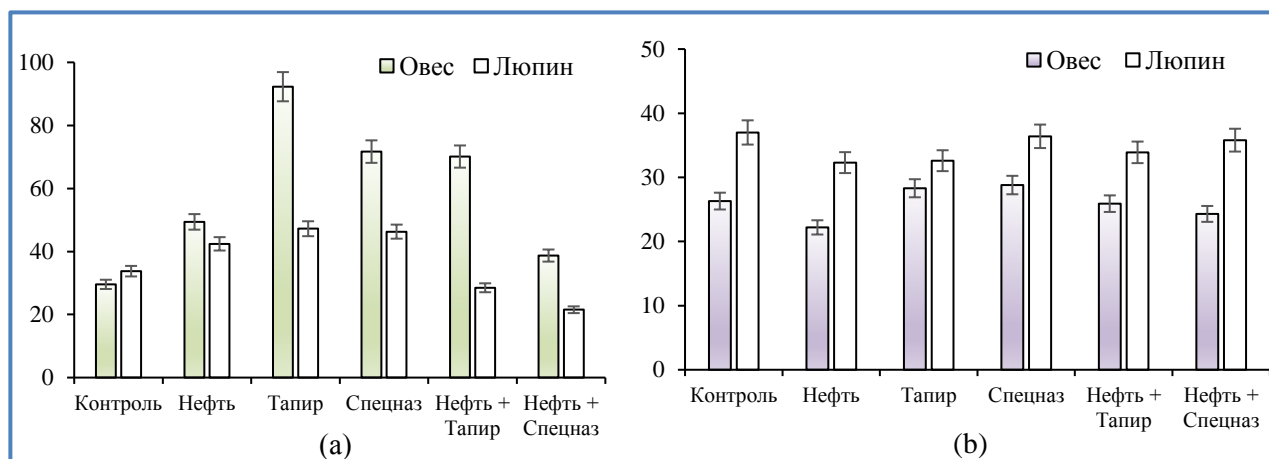
В конце эксперимента (рис. 1) разница в длине побегов у контрольных растений и в варианте с Тапиром еще увеличилась и составила 71.9 и 28.9% для овса и люпина соответственно. Однако отмечено, что при комплексном загрязнении почвы нефтью и Тапиром растения овса были выше, чем в варианте опыта, где присутствовал только гербицид, следовательно, взаимодействие данных поллютантов происходило по антагонистическому типу.

Самая большая длина корней у растений овса в конце опыта (на 22.4% больше, чем в контроле), оказалась в варианте, где почва была загрязнена только нефтью (рис. 1). Ранее мы уже отмечали данный факт [Высоцкая и др., 2019]. Способность адаптироваться к неблагоприятным условиям окружающей среды через интенсивное развитие корневой системы была выявлена у овса при концентрации нефти в почве до 8%. У люпина в почве с нефтью отмечено незначительное снижение длины корней по сравнению с контролем (на 9.3%). В вариантах, где присутствовали гербициды или гербициды вместе с нефтью, корни обоих растений были значительно короче, чем в контроле. Наибольшее угнетение корней зафиксировано в варианте с Тапиром: длина на 71.9 и на 42.4% меньше, чем в контроле.



**Рис. 1. Длина побегов (а) и корней (б) растений в процентах относительно контроля.**

Содержание МДА в присутствии нефти, гербицидов Тапир и Спецназ у растений выросло, особенно это было заметно на примере овса: в 1.7, 3.1, 2.4 раза соответственно (рис. 2). В вариантах опыта, где почва была загрязнена гербицидами и нефтью одновременно, отмечено снижение уровня МДА в побегах обоих растений, что еще раз подтверждает, что нефть выступила в качестве антидота, ингибирующего токсическое действие гербицидов.



**Рис. 2. Содержание малонового диальдегида, мкмоль/г (а) и хлорофилла, мкг/см<sup>2</sup> (b) в побегах растений.**

Наличие в почве нефти подавляло накопление хлорофилла обоими растениями на 12-15% (рис. 2). При этом растения продемонстрировали различную реакцию на присутствие гербицидов: они не оказали негативного влияния на синтез хлорофилла у овса, но у люпина в варианте с Тапиром количество данного пигмента снизилось почти на 12%, визуально было отмечено начало развития хлороза.

Количество гетеротрофов, углеводородокисляющих и олигонитрофильных микроорганизмов (табл. 1) при загрязнении почвы нефтью значительно выросло (в 2.9-7.1 раза по сравнению с контролем). В присутствии Спецназа численность данных групп почвенных микроорганизмов практически не изменилась, в присутствии Тапира – снизилась, причем в ризосфере люпина в меньшей степени. По-видимому, это связано с разным составом корневых выделений растений. Известно, что экссудаты бобовых богаче, чем у злаков, содержат много азотистых и углеродистых веществ, что позволило ризосферной микробиоте быстрее адаптироваться к экстремальным условиям.

По сравнению с почвой, загрязненной только гербицидами, в вариантах, где присутствовали гербициды и нефть, происходил заметный рост численности бактерий. Нефть использовалась как дополнительный источник органического вещества, чувствительные к гербицидам микроорганизмы погибли, но устойчивые смогли трансформировать свои ферментные системы для минерализации токсичных соединений.

Загрязнение почвы нефтью также стимулировало развитие микроскопических грибов (табл. 1), вероятно за счет активного размножения углеводородокисляющих видов [Рафикова и др., 2020]. Наличие Тапира негативно сказалось на численности микромицетов, Спецназ – сам по себе и в комплексе с нефтяными углеводородами не оказывал токсического действия на почвенные грибы, возможно вследствие того, что гербициды класса сульфонилмочевин лучше поддаются биodeградации, чем имидазолиноны [Al-Jawhari, Al-Sead, 2016; Колотова и др., 2023].

Фитотестирование показало, что наибольшее угнетение тест-культуры вызывало загрязнение почвы гербицидами, в том числе совместно с нефтью: длина корней редиса в начале опыта была меньше, чем в контроле на 54.9-65.2% (табл. 2). Энергия прорастания семян в загрязненной почве была ниже, чем в контроле на 5-20%. Благодаря ремедиации токсичность почвы уменьшилась во всех вариантах опыта кроме образцов, загрязненных Тапиром.

**Таблица 1. Численность микроорганизмов, КОЕ/г**

Вариант опыта	Гетеротрофные микроорганизмы, $\times 10^7$		Углекислородфиксирующие микроорганизмы, $\times 10^6$		Микромицеты, $\times 10^5$		Олигонитрофилы, $\times 10^7$	
	Овес	Люпин	Овес	Люпин	Овес	Люпин	Овес	Люпин
Контроль	2.23 <sup>b</sup>	3.59 <sup>b</sup>	2.21 <sup>b</sup>	1.45 <sup>a</sup>	1.37 <sup>d</sup>	30.4 <sup>b</sup>	1.44 <sup>c</sup>	2.84 <sup>b</sup>
Нефть	8.54 <sup>c</sup>	15.3 <sup>e</sup>	12.3 <sup>e</sup>	10.3 <sup>c</sup>	1.91 <sup>e</sup>	42.1 <sup>c</sup>	4.27 <sup>d</sup>	10.2 <sup>d</sup>
Тапир	0.75 <sup>a</sup>	2.81 <sup>a</sup>	1.53 <sup>a</sup>	1.43 <sup>a</sup>	0.52 <sup>a</sup>	26.8 <sup>a</sup>	0.51 <sup>a</sup>	1.73 <sup>a</sup>
Спецназ	2.05 <sup>b</sup>	4.54 <sup>c</sup>	2.38 <sup>b</sup>	3.01 <sup>b</sup>	0.95 <sup>c</sup>	44.4 <sup>c</sup>	1.23 <sup>b</sup>	2.64 <sup>b</sup>
Нефть + Тапир	8.31 <sup>c</sup>	9.54 <sup>d</sup>	8.34 <sup>d</sup>	17.1 <sup>d</sup>	0.61 <sup>b</sup>	33.0 <sup>b</sup>	1.34 <sup>bc</sup>	8.54 <sup>c</sup>
Нефть + Спецназ	9.40 <sup>d</sup>	18.1 <sup>f</sup>	3.32 <sup>c</sup>	51.1 <sup>e</sup>	1.43 <sup>d</sup>	83.2 <sup>d</sup>	7.15 <sup>e</sup>	8.21 <sup>c</sup>

Статистически различные средние значения для каждого показателя отмечены разными буквами ( $p \leq 0.05$ ).

Наибольшая эффективность фиторемедиации отмечена при выращивании растений овса и люпина на почве, загрязненной нефтью и нефтью со Спецназом. В других вариантах опыта (Спецназ и нефть + Тапир) токсичность почвы также уменьшилась, но средняя длина корней тест-культуры была ниже, чем в контроле на 19.8-28.9%, что свидетельствует о наличии в почве значительного количества высокотоксичных веществ.

**Таблица 2. Влияние токсичности почвы на прорастание семян и длину корней тест-культуры (редис сорт Розово-красный с белым кончиком)**

Вариант опыта	Энергия прорастания, %			Длина корней, мм		
	В начале опыта	В конце опыта		В начале опыта	В конце опыта	
		Овес	Люпин		Овес	Люпин
Нефть	80	90	95	43.3 <sup>c</sup>	78.4 <sup>f</sup>	72.8 <sup>f</sup>
Тапир	85	95	100	34.1 <sup>b</sup>	34.8 <sup>b</sup>	35.2 <sup>b</sup>
Спецназ	85	95	100	37.2 <sup>b</sup>	60.9 <sup>d</sup>	61.3 <sup>d</sup>
Нефть + Тапир	95	100	95	28.7 <sup>a</sup>	66.1 <sup>c</sup>	58.6 <sup>d</sup>
Нефть + Спецназ	95	95	100	34.9 <sup>b</sup>	87.6 <sup>g</sup>	72.3 <sup>f</sup>

Статистически различные средние значения отмечены разными буквами ( $p \leq 0.05$ ). На чистой почве: всхожесть – 100%, длина корней – 82.4 мм.

Таким образом, и овес, и люпин продемонстрировали высокую очищающую способность почвы, загрязненной нефтью, а также совместно нефтью и гербицидами на основе трибенурон-метила и имазетапира. Тапир как монозагрязнитель (20.0 мкл/кг почвы) оказывал выраженное угнетающее воздействие на растения-ремедианты. На наш взгляд, эта проблема может быть решена путем бактериализации растений микроорганизмами с фитостимулирующими свойствами, обладающими способностью к деградации ксенобиотиков данного класса.

#### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00130, <https://rscf.ru/project/23-24-00130/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Высоцкая Л.Б., Архипова Т.Н., Кузина Е.В. и др. Сравнение реакции растений различных видов на нефтяное загрязнение // Биомика. 2019. Т. 11 (1). С. 86–100. DOI: [10.31301/2221-6197.bmcs.2019-06](https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2019-06)
2. Держинская И.С. Питательные среды для выделения и культивирования микроорганизмов. Астрахань: Изд-во АГТУ. 2008. 348 с.
3. Колотова О., Нефедьева Е., Грибуст И. и др. Применение микробных биотехнологий для устранения в почве остатков гербицидов классов имидазолинонов и сульфонилмочевин (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 16–27. DOI: [10.25750/1995-4301-2023-4-016-027](https://doi.org/10.25750/1995-4301-2023-4-016-027)
4. Коршунова Т.Ю., Искужина М.Г., Кузина Е.В. и др. Оценка влияния различных загрязнителей на рост и развитие растений-ремедиантов // Экобиотех. 2023. Т. 6 (3). С. 156–165. DOI: [10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165)
5. Рафикова Г.Ф., Кузина Е.В., Столярова Е.А. и др. Комплексы микромицетов выщелоченного чернозема при загрязнении нефтью и внесении микроорганизмов-нефтедеструкторов // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54 (2). С. 107–115. DOI: [10.31857/S0026364820020099](https://doi.org/10.31857/S0026364820020099)
6. Al-Jawhari I.F., Al-Sead K.G. Fate of herbicide Granstar (Tribenuron methyl) in wheat field in Al-Nasiriya governorate // Int Res J Bio Sci. 2016. V. 5 (8). P. 22–37.
7. Chirakkara R.A., Cameselle C., Reddy K.R. Assessing the applicability of phytoremediation of soils with mixed organic and heavy metal contaminants // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2016. V. 15. P. 299–326. DOI: [10.1007/s11157-016-9391-0](https://doi.org/10.1007/s11157-016-9391-0)
8. Costa H., Gallego S.M., Tomaro M.L. Effect of UV-B radiation on antioxidant defense system in sunflower cotyledons // Plant Sci. 2002. V. 162 (6). P. 939–945. DOI: [10.1016/S0168-9452\(02\)00051-1](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00051-1)
9. Mamirova A., Baubekova A., Pidlisnyuk V. et al. Phytoremediation of soil contaminated by organochlorine pesticides and toxic trace elements: Prospects and limitations of *Paulownia tomentosa* // Toxics. 2022. V. 10 (8). P. 465. DOI: [10.3390/toxics10080465](https://doi.org/10.3390/toxics10080465)
10. Panchenko L., Muratova A., Dubrovskaya E. et al. Natural and technical phytoremediation of oil-contaminated soil // Life. 2023. V. 13 (1). P. 177. DOI: [10.3390/life13010177](https://doi.org/10.3390/life13010177)
11. Raymond R.L. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons // Develop. Industr. Microbiol. 1961. V. 2 (1). P. 23–32.
12. Tarla D.N., Erickson L.E., Hettiarachchi G.M. et al. Phytoremediation and bioremediation of pesticide-contaminated soil // Applied Sciences. 2020. V. 10 (4). P. 1217. DOI: [10.3390/app10041217](https://doi.org/10.3390/app10041217)
13. Yavari S., Malakahmad A., Sapari N.B. A review on phytoremediation of crude oil spills // Water, Air, & Soil Pollution. 2015. V. 226. P. 1–18. DOI: [10.1007/s11270-015-2550-z](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2550-z)
14. Ye S., Zeng G., Wu H. et al. Biological technologies for the remediation of co-contaminated soil // Critical reviews in biotechnology. 2017. V. 37 (8). P. 1062–1076. DOI: [10.1080/07388551.2017.1304357](https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1304357)

Цитировать как

Кузина Е.В., Мухаматдырова С.Р., Искужина М.Г., Кульбаева Л.А., Коршунова Т.Ю. Фиторемедиация почвы, комплексно загрязненной нефтью и гербицидами, с использованием растений овса и люпина // Экобиотех, 2024, Т. 7 № 2. С. 176-181. DOI: [10.31163/2618-964X-2024-7-3-176-181](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2024-7-3-176-181) EDN: VBHXRV

Cited as

Kuzina E.V., Mukhamatdyarova S.R., Iskuzhina M.G., Kulbaeva L.A., Korshunova T.Y. Phytoremediation of soil comprehensively contaminated with oil and herbicides using oat and lupin plants. *Ekobiotek*. 2024, V. 7 (2). P. 176-181. DOI: [10.31163/2618-964X-2024-7-3-176-181](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2024-7-3-176-181) EDN: VBHXRV (In Rus.)