

УДК 631.45; 631.95

AGRIS F 40

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/10>*Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Игнатьев Ю.А.*

## РАЗВИТИЕ ОДНО- И ДВУДОЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ НА РЕКУЛЬТИВИРОВАННЫХ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ДЕРНОВЫХ ПОЧВАХ

*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

**Аннотация.** В лабораторных хронических экспериментах определено влияние содержания нефтепродуктов (НП) в рекультивированной аллювиальной дерновой тяжелосуглинистой (АДтс) и легкосуглинистой (АДлс) почве на рост, урожайность зеленой массы и развитие корневой системы пшеницы яровой и гороха посевного. Высокое остаточное содержание НП в рекультивированной почве приводило к увеличению времени прорастания семян, при отсутствии влияния на всхожесть. При выращивании пшеницы на рекультивированной АДтс почве токсическое действие проявлялось только на ранних этапах развития растений в варианте, содержащем 16.9 г/кг НП. В варианте АДлс почвы, содержащем 21.8 г/кг поллютанта, торможение роста растений наблюдалось в ходе всего эксперимента. В хронических экспериментах по выращиванию гороха на тяжелосуглинистой почве содержащей 16.9 г/кг НП, на легкосуглинистой почве содержащей 11.7 г/кг и выше, наблюдалось торможение роста растений, с тенденцией увеличения токсического эффекта к концу вегетационного опыта. Нефтяные загрязнения в концентрации до 11-12 г/кг в рекультивированной аллювиальной дерновой тяжело- и легкосуглинистой почвах не оказывают влияние на урожайность зеленой массы пшеницы, в концентрации 9.7 г/кг и выше ингибируют рост растений гороха, приводят к снижению урожайности их зеленой массы. Эффективность окисления нефтепродуктов при выращивании растений на рекультивированной аллювиальной дерновой почве не превышала 37% и определялась исходной концентрацией поллютанта. Присутствие НП в почве приводило к изменению структуры корневой системы выращиваемых растений. Испытанные растения при культивировании на тяжелых почвах более устойчивы к отрицательному действию НП. Полученные данные показывают, что горох посевной более чувствителен к присутствию НП в рекультивированной почве.

**Ключевые слова:** аллювиальные почвы, нефтепродукты (НП), рекультивация, растения, пшеница, горох.

**Сведения об авторах:** Утомбаева Алина Александровна, ORCID: 0000-0002-7407-9108, Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Россия, [semionova.alin@yandex.ru](mailto:semionova.alin@yandex.ru); Петров Андрей Михайлович, ORCID: 0000-0002-5117-

**Abstract.** Laboratory chronic experiments have determined the effect of the content of petroleum products (PP) in reclaimed alluvial turf heavy loamy and light loamy soil on the growth, yield of green mass and the development of the root system of spring wheat and seed peas. High residual PP content in reclaimed soil resulted in increased seed germination time, with no effect on germination. When growing wheat on reclaimed alluvial turf heavy loamy soil, the toxic effect was manifested only in the early stages of plant development in a variant containing 16.9 g/kg of PP. In the alluvial turf light loamy soil version containing 21.8 g/kg of pollutant, inhibition of plant growth was observed throughout the experiment. In chronic experiments for growing peas on heavy coal soil containing 16.9 g/kg of PP, on light coal soil containing 11.7 g/kg and higher, plant growth inhibition was observed, with a tendency to increase the toxic effect towards the end of the growing experience. Oil contaminants in concentration up to 11-12 g/kg in reclaimed alluvial turf heavy and light-coal soils do not affect the yield of green wheat mass, in concentration 9.7 g/kg and higher inhibit the growth of pea plants, lead to a decrease in the yield of their green mass. The oxidation efficiency of petroleum products when growing plants on reclaimed alluvial turf soil did not exceed 37% and was determined by the initial concentration of pollutant. The presence of PP in the soil led to a change in the structure of the root system of the plants being grown. Tested plants when cultivated on heavy soils are more resistant to negative PP. The findings show that sown peas are more sensitive to the presence of PP in reclaimed soil.

**Keywords:** alluvial soils, petroleum products (PP), recultivation, plants, wheat, peas.

**About the authors:** Utombaeva Alina Alexandrovna, ORCID: 0000-0002-7407-9108, Institute of Ecology and Subsoil Use Problems of the Academy of Sciences of Tatarstan, Kazan, Russia, [semionova.alin@yandex.ru](mailto:semionova.alin@yandex.ru); Petrov Andrey Mikhailovich, ORCID: 0000-0002-5117-2609, Ph.D., Institute of Ecology and Subsoil Use

2609, канд. биол. наук, Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Россия, [zram2@rambler.ru](mailto:zram2@rambler.ru); Зайнулгабидинов Эрик Ренатович, ORCID: 0000-0002-5372-9984, канд. биол. наук, Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Россия, [comp05@mail.ru](mailto:comp05@mail.ru); Игнатьев Юрий Алексеевич, ORCID: 0000-0001-9332-7606, канд. хим. наук, Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, г. Казань, Россия, [chromjura@mail.ru](mailto:chromjura@mail.ru)

Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia, [zram2@rambler.ru](mailto:zram2@rambler.ru); Zainulgabidinov Erik Renatovich, ORCID: 0000-0002-5372-9984, Ph.D., Institute of Ecology and Subsoil Use Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia, [comp05@mail.ru](mailto:comp05@mail.ru); Ignatiev Yury Alekseevich, ORCID: 0000-0001-9332-7606, Ph.D., Institute of Ecology and Subsoil Use Problems of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia, [chromjura@mail.ru](mailto:chromjura@mail.ru)

Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Игнатьев Ю.А. Развитие одно- и двудольных растений на рекультивированных нефтезагрязненных аллювиальных дерновых почвах // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2022. №1(57). С. 91–101. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/10>

Utombaeva, A.A., Petrov, A.M., Zainulgabidinov, E.R. & Ignatiev, Yu.A. (2022). Development of One- and Dicotyledic Plants on Reclaimed Oil-contaminated Alluvial Turf Soils. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, (1(57)), 91–101. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/22-1/10>

**Введение.** Добыча, разведка и транспортировка нефтяных углеводородов для удовлетворения растущего спроса мирового населения на ископаемое топливо наносят ущерб окружающей среде, загрязняя ее, особенно почву [20]. Загрязнение почвы нефтяными углеводородами является серьезной проблемой глобального масштаба, прежде всего в странах добывающих, транспортирующих и перерабатывающих нефть [25].

В настоящее время биологическая рекультивация рассматривается, как наиболее перспективная. Относительно традиционных физико-химических способов почвенной рекультивации, биологические являются более дешевыми и эффективными, обеспечивают удаление широкого спектра органических поллютантов окружающей среды, в том числе и нефтяных загрязнителей [16; 23].

Фиторемедиация, как любой подход имеет свои ограничения. Основным является негативное влияние поллютанта на рост и развитие возделываемых культур [5]. В условиях загрязнения нефтью значительно снижается площадь ассимиляционной поверхности, корневая система меняет свою морфологию [9]. Нарушения обменных процессов в присутствии нефтяных углеводородов вызывают окислительный стресс, задержку роста и деформацию листьев, что приводит к некрозу тканей и клеток растений [24].

Полностью устойчивых к техногенному загрязнению видов растений нет. Существует лишь некоторый порог чувствительности растений к определенным концентрациям поллютанта, при которых физиологические изменения не приводят к их гибели [6; 28]. Соответственно необходимо уделять особое внимание подбору растений, которые, в частности, могут хорошо развиваться и давать большую биомассу на загрязненных почвах, обладают мощной корневой системой, способной совместно с симбиотическими микроорганизмами ризосферы трансформировать токсичную часть загрязнений [1; 7; 27].

Изучение ответной реакции растений на действие разных доз нефти позволяет выявить факторы, обеспечивающие их устойчивое развитие, и в дальнейшем использовать полученные результаты при разработке методов эффективной фитореккультурации почв. Выбор

фиторемедиаторов для конкретных участков является эмпирическим и основан, как правило, на результатах лабораторных экспериментов [18].

Прорастание семян — одно из наиболее важных направлений жизненного цикла растений, за которым следует выход из состояния покоя семян [14; 22]. Поэтому лабораторные методы фитотестирования, как наиболее доступные и экспрессные, широко используются в экологическом мониторинге, при разработке нормативов допустимого остаточного содержания нефтепродуктов (НП) в почве [10; 13].

Показатели изменения линейного роста и биомассы растений применяются при выяснении уровня загрязнения почвы нефтью и устойчивости сельскохозяйственных культур к негативным факторам [8]. Растения, относящиеся к семействам злаковые и бобовые, являются наиболее подходящими культурами для фиторекультивации нефтезагрязненных территорий [12; 15; 19; 21; 26]. Таким образом, при оценке воздействия нефтезагрязненных почв на растения такие показатели, как всхожесть семян, изменения линейного роста и биомассы весьма информативны. Однако вопросы устойчивости отдельных видов растений к нефтяному загрязнению в конкретных почвенно-климатических условиях остаются практически нерешенными.

Целью данного исследования стало изучение влияния остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в рекультивированных аллювиальных дерновых тяжелосуглинистых (АДтс) и легкосуглинистых (АДлс) почвах на рост пшеницы яровой и гороха посевного в хроническом лабораторном эксперименте.

**Материалы и методы исследования.** Лабораторные хронические вегетационные опыты проводились согласно ГОСТ Р ИСО 22033-2009 [2] при температуре окружающего воздуха 19-26°C и искусственном освещении с интенсивностью света 4000 Лк. Влажность почв поддерживалась на уровне 60% от полной влагоемкости. В качестве тест-объектов были использованы два вида растений: односемядольное растение – пшеница яровая (*Triticum vulgare* L.) сорта «Йолдыз» и двусемядольное растение — горох посевной (*Pisum sativum* L.) сорта «Казанец». Всхожесть семян составляла более 95%.

Эксперименты по определению фитотоксичности включали несколько вариантов с различным остаточным содержанием поллютанта, в условно рекультивированных предварительно загрязненных сернистой нефтью Ямашинского месторождения АДтс и АДлс почвах Республики Татарстан (варианты В1–В4). Контролем (К) служила чистая, не загрязненная нефтью почва. В ходе рекультивации для активизации физико-химических и биологических процессов еженедельно в течение 5 месяцев осуществляли рыхление контрольных и опытных почвенных образцов. В хронических экспериментах, в качестве вегетационных сосудов использовали пластиковые емкости диаметром 11 см и объемом 550 мл. Количество повторностей в каждом варианте – 3. В опытные и контрольные емкости высаживали по 10 семян. После учета проросших семян число растений в каждом сосуде сокращали до 8. В первую неделю опыта ежедневно измеряли высоту растений. На 14-й день после появления всходов в каждой емкости на уровне поверхности почвы срезали по 4 выбранных случайным образом тест-растения. За оставшимися растениями вели наблюдения в течение 44 суток, после чего их аккуратно освобождали от земли и определяли сухую зеленую массу и сухую массу корней [11].

Сухую массу зеленых проростков и корней растений определяли путем высушивания образцов в термостате, температуру в которой поддерживают на уровне 100-105°C. Перед

высушиванием бюкс с навеской взвешивают на аналитических весах. Высушивание проводят до тех пор, пока бюкс с навеской не достигнет постоянного веса.

Остаточное содержание НП в почвах определяли сопоставлением потерь при прокаливании массы образцов чистых и загрязненных нефтью почв. Прокалывание подготовленных почвенных образцов осуществлялось в муфельной печи “SNOL 8,2/1100” при температуре 600<sup>0</sup>С в фарфоровых тиглях. Возможности использования метода потерь при прокаливании, условия прокалывания были рассмотрены ранее [3; 4]. Расчет НП производился по формуле [3]:

$$OCH = \sum_{i=1}^n (m_{i3} - \bar{M}_K) / n,$$

где OCH – масса органических соединений нефти (в данной работе рассматривается как НП),  $m_{i3}$  – потеря массы после прокалывания отдельного образца нефтезагрязненной пробы,  $\bar{M}_K$  – средняя потеря массы после прокалывания для контрольных образцов,  $n$  – количество повторностей (повторности 3). Полученные результаты подвергались стандартной статистической обработке при помощи программы OpenOffice Calc. Исследуемые варианты сравнивались используя t-критерий Стьюдента. Различия признавались значимыми при  $P \leq 0,05$ .

**Результаты и обсуждение.** Эксперименты показали, что в АДтс почве испытанные концентрации нефтяных загрязнений практически не влияют на всхожесть семян пшеницы (табл. 1).

Таблица 1

**Всхожесть семян пшеницы и гороха на АДтс почве  
при разном остаточном содержании нефтяных загрязнений**

Вариант	Содержание НП, г/кг	Всхожесть, %					
		Пшеница			Горох		
		3 сутки	6 сутки	8 сутки	3 сутки	6 сутки	8 сутки
К	<0.05	80	95	100	5	85	100
B1	4.5	65	100	100	5	85	100
B2	8.1	85	90	100	10	80	100
B3	11.8	85	90	100	5	90	100
B4	16.9	60	90	100	15	50	100

На третьи сутки, в варианте с максимальным содержанием поллютанта, всхожесть была на 20% ниже, чем в контроле. На шестые сутки эксперимента различия нивелировались, а к 8 суткам она во всех вариантах имела одинаковые максимально достижимые значения. В варианте B4 АДтс почвы на 3 сутки всхожесть семян была в 3 раза выше, чем в контроле, на шестые сутки, наоборот, на 35% ниже, чем в чистой почве. На 8 сутки эксперимента во всех опытных вариантах взошли все посаженные растения (табл. 1).

В эксперименте с легкосуглинистой почвой на 3 сутки в вариантах B2 и B4 всхожесть семян пшеницы была на 20% ниже, чем в контроле (табл. 2). В дальнейшем, различия нивелировались, а на 8 сутки эксперимента всхожесть семян во всех вариантах составляла 100%. В опыте на АДлс почве токсическое действие поллютанта в вариантах B2-B4 задерживало прорастание семян гороха, при устранении различий между контролем и опытом к 8 суткам культивирования.

Таблица 2

**Всхожесть семян пшеницы и гороха на АДс почве  
при разном остаточном содержании нефтяных загрязнений**

Вариант	Содержание НП, г/кг	Всхожесть, %					
		Пшеница			Горох		
		3 сутки	6 сутки	8 сутки	3 сутки	6 сутки	8 сутки
К	<0.05	85	90	100	15	95	100
B1	5.4	75	95	100	15	100	100
B2	9.7	60	90	100	15	40	100
B3	11.7	75	90	100	10	40	100
B4	21.8	60	85	100	0	50	100

Анализ динамики роста пшеницы на АДс почве в варианте B4 выявил достоверное ингибирующее влияние НП в первые 2 недели эксперимента (на 54% на 6 сутки и на 35% на 13 сутки) (рис. 1). На 6 сутки вегетационного эксперимента на АДс почве в вариантах B2 и B4 наблюдалось 32% и 54% торможение роста пшеницы (рис. 2). В варианте B4 ингибирующее действие поллютанта сохранялось при увеличении времени экспозиции, на 4-6 неделях эксперимента оно составляло 25-38%.

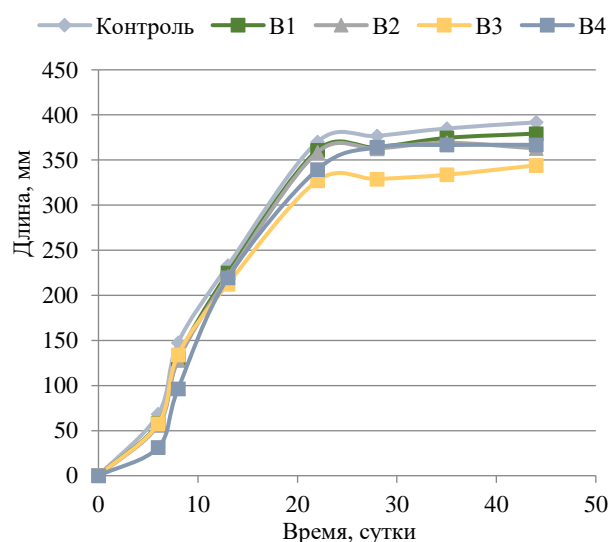


Рис. 1. Динамика роста пшеницы в хроническом эксперименте на АДс почве при разном остаточном содержании НП

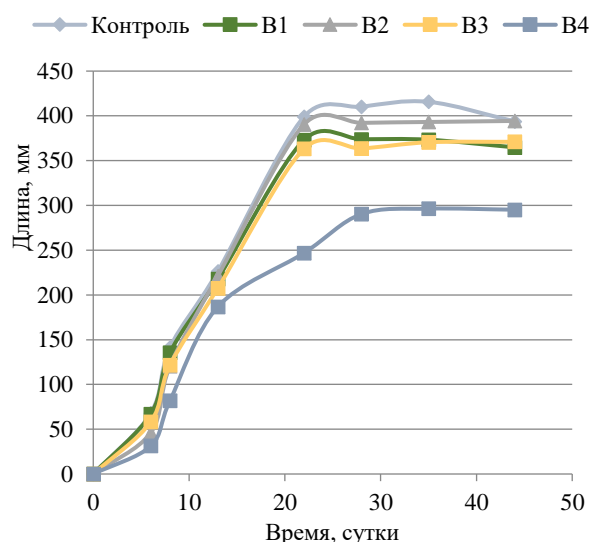


Рис. 2. Динамика роста пшеницы в хроническом эксперименте на АДс почве при разном остаточном содержании

Двудольное растение более чувствительно к нефтяному загрязнению АДс почвы. Так, в варианте B1 в первые 4 недели эксперимента наблюдалось 22-32% ингибирование роста гороха. В варианте B2 на 8 сутки экспозиции длина растений была на 23%, в B3 на 13 сутки на 28% меньше, чем в контроле (рис. 3). Как и в случае с пшеницей, в варианте B4 в ходе всего эксперимента влияние поллютанта проявлялось в замедлении роста, при незначительном увядании и подсыхании листьев гороха на последней неделе культивирования. В первую неделю экспозиции в данном варианте длина растений была на 44-55%, а на 5-6 неделе на 25-38% меньше, чем в контроле.

При культивировании гороха на АДс почве на восьмые сутки в вариантах B1 и B2 наблюдалось 26% и 49% торможение роста растений (рис. 4). При более высоком содержании поллютанта (варианты B3 и B4) ингибирующее действие на двудольные растения проявлялось на

протяжении всего периода наблюдений, причем в варианте В3 в интервале 22-42 суток эксперимента оно было более значительным и составляло 44-53%. Токсическое действие поллютанта в данных вариантах приводило к подсыханию и пожелтению верхушечных листьев. Представленные данные в целом коррелируют с ранее полученными при культивировании одно- и двудольных растений на загрязненной нефтью аллювиальной луговой почве результатами [8].

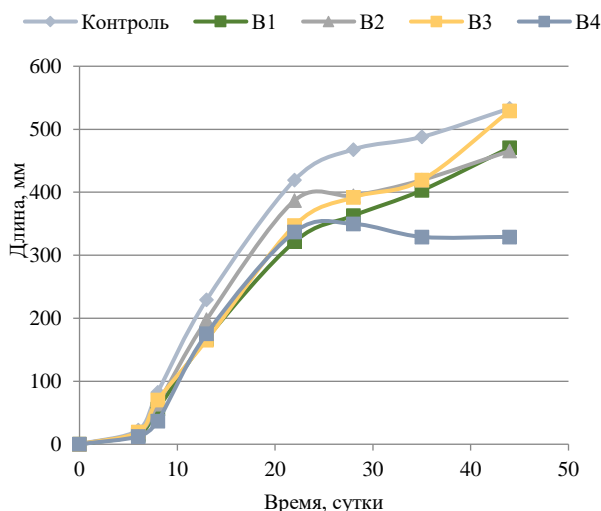


Рис. 3. Динамика роста гороха в хроническом эксперименте на АДтс почве при разном остаточном содержании НП

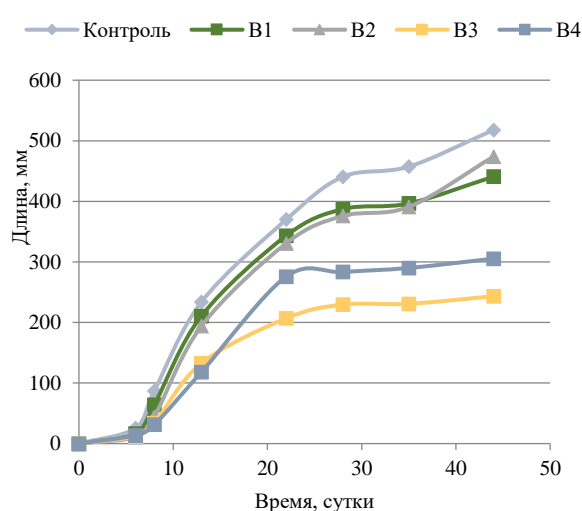


Рис. 4. Динамика роста гороха в хроническом эксперименте на АДлс почве при разном остаточном содержании НП

Высокое остаточное содержание нефтяных углеводородов в почве оказывает воздействие не только на интенсивность роста, но и на урожайность зеленой массы, развитие корневой системы растений. Так в вариантах В4 обеих почв наблюдалось снижение урожайности зеленой биомассы пшеницы, которая в конце эксперимента в легкосуглинистой почве была на 48%, а в тяжелосуглинистой на 23% ниже, чем в контроле (рис. 5).

В эксперименте на АДлс почве было выявлено наличие прямой зависимости между длиной растения пшеницы и ее зеленой массой в зависимости от дозы поллютанта ( $y = 0,0008x - 0,1512$  при значении  $R^2 = 0.9494$ ), при отсутствии таковой у пшеницы на АДтс почве и у гороха на обеих почвах. Более интенсивное, чем в контроле накопление массы корневой системы пшеницы было зарегистрировано во всех опытных вариантах на АДтс и вариантах В1 и В4 на АДлс почве (рис. 5). Необходимость активизации массообменных процессов в системе почва-растение при высоком содержании НП в вариантах В4 стимулировало развитие корневой системы, масса которой была в 1,9–2,0 раза больше, чем в контроле. Следует отметить, что корневая система пшеницы в опытных вариантах имела менее разветвленную, чем в контроле, более тонкую и длинную, чем-то похожую на стержневую структуру.



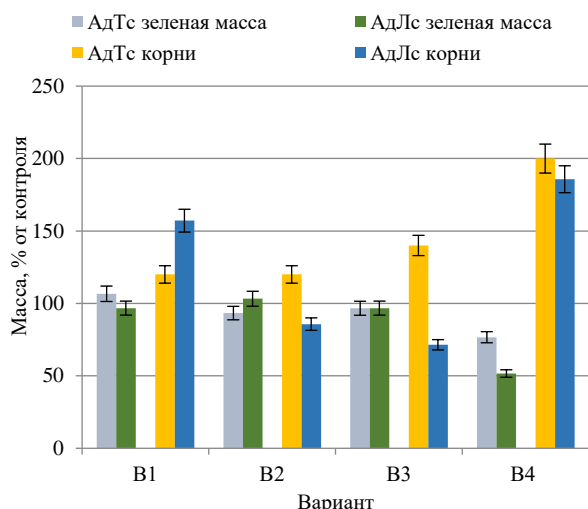


Рис. 5. Влияние остаточного содержания НП на урожайность сухой зеленой массы и развитие корневой системы пшеницы выросшей на аллювиальной дерновой почве разного гранулометрического состава

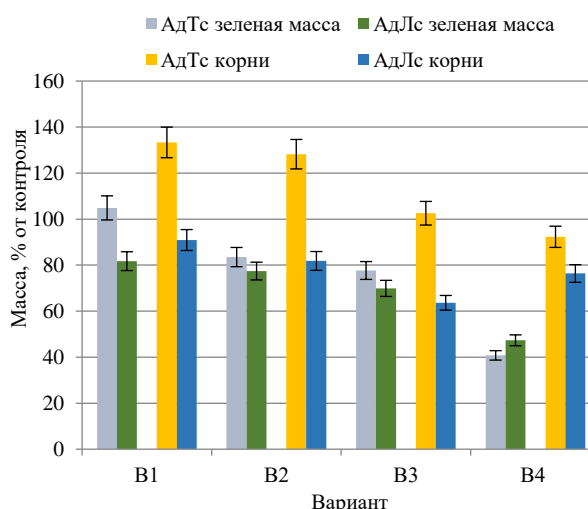


Рис. 6. Влияние остаточного содержания НП на урожайность сухой зеленой массы и развитие корневой системы гороха выросшего на аллювиальной дерновой почве разного гранулометрического состава

В хронических экспериментах с горохом, в вариантах В3–В4 на АдТс и вариантах В2–В4 на АдЛс почвах урожайность зеленой массы была достоверно ниже, чем в контроле (рис. 6). Культивирование двудольных растений на тяжелосуглинистой почве, содержащей до 8.1 г/кг НП, стимулировало развитие корневой системы, при отсутствии отрицательного влияния более высоких концентраций поллютанта. Во всех опытных вариантах на АдЛс почве, масса корневой системы гороха была на 9–36% меньше чем в контроле. Корневая система гороха в опытных вариантах имела достаточно развитую стеблевую корневую систему. По мере роста содержания НП в почве наблюдалось уменьшение толщины основного корня при увеличении его длины. Сопоставление полученных данных показало, что интенсивность метаболизма поллютанта в ходе выращивания определялось его концентрацией в среде, характеристиками почвы, свойствами растений. Выращивание пшеницы на АдТс почве привело к снижению содержания поллютанта в вариантах В2 и В3, в АдЛс почве, в вариантах В2–В4. При культивировании гороха на АдТс почве снижение содержания НП наблюдалось в вариантах В2 и В3, на АдЛс в вариантах В1 и В4 (табл. 3).

Таблица 3

**Относительное остаточное содержание НП в опытных вариантах аллювиальной дерновой почвы выращивания пшеницы и гороха (% от исходного)**

Вариант	Тест-объект			
	Пшеница		Горох	
	АдТс	АдЛс	АдТс	АдЛс
B1	100%	90%	100%	63%
B2	74%	63%	83%	100%
B3	69%	64%	84%	95%
B4	98%	79%	100%	79%

Особенностью использованной в работе АдЛс почвы оказалось преобладание в ней четных n-алканов над нечетными, с максимумом их содержания в среднемoleкулярной области ( $C_{14}$  -  $C_{26}$ ), что рассматривается как довольно редкое явление в геосфере [10].

Вышеуказанная особенность почвы, способность гороха активизировать почвенные микробиологические процессы, вероятно, явились причиной наблюдаемых отличий в эффективности деструкции поллютанта в АДлс почвах в вариантах с разным исходным содержанием НП.

**Выводы.** Высокое остаточное содержание НП в рекультивированной почве приводило к увеличению времени прорастания семян, при отсутствии влияния на их всхожесть. При выращивании пшеницы на рекультивированной АДтс почве токсическое действие НП проявлялось только на ранних этапах развития растений при остаточном содержании поллютанта 16,9 г/кг. В варианте АДлс почвы, содержащей 21,8 г/кг поллютанта, торможение роста растений пшеницы наблюдалось в ходе всего эксперимента. При выращивании гороха на загрязненной АДтс почве содержащей НП в концентрации 16,9 г/кг, на АДлс почве содержащей 11,7 г/кг и выше на протяжении всего эксперимента наблюдалось торможение роста растений, с тенденцией увеличения токсического эффекта к концу эксперимента.

Нефтяные загрязнения в концентрации до 11-12 г/кг в рекультивированной аллювиальной дерновой тяжело- и легкосуглинистой почвах не оказывают влияние на урожайность зеленой массы пшеницы.

Остаточное содержание нефтяных загрязнений в аллювиальной дерновой почве 9,7 г/кг и выше ингибирует рост растений гороха, приводит к снижению урожайности зеленой массы.

Культивирование пшеницы и гороха в вариантах, содержащих в АДтс почве 16,9 г/кг поллютанта, приводило к 23 и 59% снижению урожайности зеленой массы растений, в АДлс почве при остаточном содержании нефтепродуктов 21,8 г/кг снижение урожайности составило 48% и 53%, соответственно. Присутствие поллютанта в почве приводило к изменению структуры корневой системы выращиваемых растений.

Эффективность окисления нефтяных загрязнений при выращивании растений на рекультивированной аллювиальной дерновой почве не превышает 37% и определяется их исходной концентрацией. Одно- и двудольные культурные растения при культивировании на тяжелых почвах более устойчивы к отрицательному действию НП. Полученные данные показывают, что в сравнении с пшеницей, двудольное растение горох посевной более чувствительно к присутствию НП в рекультивированной почве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вершинин А.А., Каримуллин Л.К., Петров А.М., Кузнецова Т.В. Влияние фиторекультивационных мероприятий на активность микробного сообществанефтезагрязненной аллювиальной дерновой почвы // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №1. С. 52-57.
2. ГОСТ Р ИСО 22033-2009 «Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность в отношении высших растений».
3. Зайнулгабидинов Э.Р., Игнатьев Ю.А., Петров А.М. Оптимизация метода потери массы при прокаливании для определения остаточного содержания органических соединений нефти в загрязненных почвах // Российский журнал прикладной экологии. 2021. №1. С. 64-71.
4. Игнатьев Ю.А., Зайнулгабидинов Э.Р., Петров А.М. Применение метода прокаливании для определения содержания аллохтонных углеводов нефти в серых лесных почвах // Российский журнал прикладной экологии. 2018. №3. С. 34-37.
5. Киреева Н.А., Водопьянов В.В. Мониторинг растений, используемых для фиторемедиации нефтезагрязненных почв // Экология и промышленность России. 2007. №9. С. 46-47.
6. Киреева Н.А., Григориади А.С., Баширова Р.М., Амирова А.Р. Использование бархатцев прямостоячих *Tagetes erecta* L. для фиторемедиации почвы, загрязненной нефтяными углеводородами // Агрохимия. 2012. №5. С. 66-72.



7. Киреева Н.А., Григориади А.С., Водопьянов В.В., Амирова А.Р. Подбор растений для фиторемедиации почв, загрязненных нефтяными углеводородами // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13, №5. С. 184–187.
8. Кольцова Т.Г., Григорьян Б.Р., Сунгатуллина Л.М., Петров А.М., Башкиров В.Н. Оценка фитотоксичности серых лесных почв в условиях нефтяного загрязнения // Вестник Технологического университета. 2016. Т. 19. №18. С. 185–191.
9. Мазунина Л.Е. Особенности анатомии и морфологии высших растений в условиях нефтяного загрязнения // Вестник Нижневартского государственного гуманитарного университета. 2009. №1. С. 16–18.
10. Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Шагидуллин Р.Р., Иванов Д.В., Кузнецова Т.В., Каримуллин Л.К. Разработка нормативов допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах для земель лесного фонда республики татарстан // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. №20. С. 265–270.
11. Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Игнатьев Ю.А., Кузнецова Т.В. Динамика роста высших растений на рекультивированных нефтезагрязненных аллювиальных луговых почвах разного гранулометрического состава // Российский журнал прикладной экологии. 2020. №1. С. 60–65.
12. ФР.1.39.2006.02264. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно загрязненных почв 2009. С-Пб. 22 с.
13. Шагидуллин Р.Р., Петров А.М., Иванов Д.В., Тарасов О.Ю., Шагидуллина Р.А., Буфатина М.А. Методические подходы к нормированию содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах // Экология и промышленность России. 2011. №6. С. 24–286.
14. Adam G., Duncan H. Influence of diesel fuel on seed germination // Environmental pollution. 2002. Vol. 120. №2. P. 363–370. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00119-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00119-7)
15. Allamin I.A., Halmi M.I.E., Yasid N.A., Ahmad S.A., Abdullah S.R.S., Shukor Y. Rhizodegradation of petroleum oily sludge-contaminated soil using *Cajanus cajan* increases the diversity of soil microbial community // Scientific reports. 2020. Vol. 10. №1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60668-1>
16. Alotaibi F., Hijri M., St-Arnaud M. Overview of Approaches to Improve Rhizoremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soils // Applied Microbiology. 2021. Vol. 1. №2. P. 329–351. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol1020023>
17. Dmitrieva T.V. Phytoremediation of Oil-Sludge-Contaminated Soil // International Journal of Phytoremediation. 2008. Vol.10. №6. P. 486–502. <https://doi.org/10.1080/15226510802114920>
18. Euliss K., Ho C. H., Schwab A. P., Rock S., Banks M. K. Greenhouse and field assessment of phytoremediation for petroleum contaminants in a riparian zone // Bioresource technology. 2008. Vol. 99. №6. P. 1961–1971. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.055>
19. Gamage S.S.W., Masakorala K., Brown M.T., Gamage S.M.K. W. Tolerance of *Impatiens balsamina* L., and *Crotalaria retusa* L. to grow on soil contaminated by used lubricating oil: A comparative study // Ecotoxicology and environmental safety. 2020. Vol. 188. P. 109911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109911>
20. Haider F.U., Ejaz M., Cheema S.A., Khan M.I., Zhao B., Liqun C., Mustafa A. Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies // Environmental Research. 2021. Vol. 197. P. 111031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111031>
21. Hoang S.A., Lamb D., Seshadri B., Sarkar B., Cheng Y., Wang L., Bolan N. S Petroleum hydrocarbon rhizoremediation and soil microbial activity improvement via cluster root formation by wild proteaceae plant species // Chemosphere. 2021. Vol. 275. P. 130135. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130135>
22. Huybrechts M., Cuypers A., Deckers J., Iven V., Vandionant S., Jozefczak M., Hendrix S. Cadmium and plant development: an agony from seed to seed // International journal of molecular sciences. 2019. Vol. 20. №16. P. 3971. <https://doi.org/10.3390/ijms20163971>
23. Kondrashina V., Strijakova E., Zinnatshina L., Bocharnikova E., Vasilyeva G. Influence of activated carbon and other additives on bioremediation rate and characteristics of petroleum-contaminated soils // Soil Science. 2018. Vol. 183. №4. P. 150–158. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000234>
24. Mukome F.N., Buelow M.C., Shang J., Peng J., Rodriguez M., Mackay D.M., Parikh S.J. Biochar amendment as a remediation strategy for surface soils impacted by crude oil // Environmental Pollution. 2020. Vol. 265. P. 115006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115006>
25. Muratova A.Y., Dmitrieva T.V., Panchenko L.V., Turkovskaya O.V. Phytoremediation of oil-sludge-contaminated soil // International Journal of Phytoremediation. 2008. Vol. 10. №6. P. 486–502. <https://doi.org/10.1080/15226510802114920>
26. Panchenko L., Muratova A., Turkovskaya O. Comparison of the phytoremediation potentials of *Medicago falcata* L. and *Medicago sativa* L. in aged oil-sludge-contaminated soil // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24. №3. P. 3117–3130. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8025-y>

27. Prabakaran K., Li J., Anandkumar A., Leng Z., Zou C.B., Du D. Managing environmental contamination through phytoremediation by invasive plants: A review // *Ecological Engineering*. 2019. Vol. 138. P. 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.002>

28. Vasilyeva G.K., Kondrashina V.S., Strijakova E.R., Pinsky D.L. Express-phytotest for choosing conditions and following process of soil remediation // *Environmental Geochemistry and Health*. 2020. P. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00727-8>

## REFERENCES

1. Vershinin, A.A., Karimullin, L.K., Petrov, A.M., & Kuznetsova, T.V. (2021). Vliyanie fitorekul'tivatsionnykh meropriyatii na aktivnost' mikrobnogo soobshchestvaneftezagryaznennoi allyuvial'noi dernovoi pochvy. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*, (1), 52-57. (in Russ.).
2. GOST R ISO 22033-2009 "Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Khronicheskaya toksichnost' v otnoshenii vysshikh rastenii". (in Russ.).
3. Zainulgabidinov, E.R., Ignat'ev, Yu.A., & Petrov, A.M. (2021). Optimizatsiya metoda poteri massy pri prokalivani dlya opredeleniya ostatochnogo soderzhaniya organicheskikh soedinenii nefiti v zagryaznennykh pochvakh. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*, (1), 64-71. (in Russ.).
4. Ignat'ev, Yu.A., Zainulgabidinov, E.R., & Petrov, A.M. (2018). Primenenie metoda prokalivaniya dlya opredeleniya soderzhaniya allokhthonnykh uglevodorodov nefiti v serykh lesnykh pochvakh. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*, (3), 34-37. (in Russ.).
5. Kireeva, N.A., & Vodop'yanov, V.V. (2007). Monitoring rastenii, ispol'zuemykh dlya fitoremediatsii neftezagryaznennykh pochv. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, (9), 46-47. (in Russ.).
6. Kireeva, N.A., Grigoriadi, A.S., Bashirova, R.M., & Amirova, A.R. (2012). Ispol'zovanie barkhattsev pryamostoyachikh *Tagetes erecta* L. dlya fitoremediatsii pochvy, zagryaznennoi nefityanymi uglevodorodami. *Agrokimiya*, (5), 66-72. (in Russ.).
7. Kireeva, N.A., Grigoriadi, A.S., Vodop'yanov, V.V., & Amirova, A.R. (2011). Podbor rastenii dlya fitoremediatsii pochv, zagryaznennykh nefityanymi uglevodorodami. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 13(5), 184-187. (in Russ.).
8. Kol'tsova, T.G., Grigor'yan, B.R., Sungatullina, L.M., Petrov, A.M., & Bashkirov, V.N. (2016). Otsenka fitotoksichnosti serykh lesnykh pochv v usloviyakh nefityanogo zagryazneniya. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 19(18), 185-191. (in Russ.).
9. Mazunina, L.E. (2009). Osobennosti anatomii i morfologii vysshikh rastenii v usloviyakh nefityanogo zagryazneniya. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, (1), 16-18. (in Russ.).
10. Petrov, A.M., Zainulgabidinov, E.R., Shagidullin, R.R., Ivanov, D.V., Kuznetsova, T.V., & Karimullin, L.K. (2013). Razrabotka normativov dopustimogo ostatochnogo soderzhaniya nefiti i produktov ee transformatsii v pochvakh dlya zemel' lesnogo fonda respubliki tatarstan. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 16(20), 265-270. (in Russ.).
11. Utombaeva, A.A., Petrov, A.M., Zainulgabidinov, E.R., Ignat'ev, Yu.A., & Kuznetsova, T.V. (2020). Dinamika rosta vysshikh rastenii na rekul'tivirovannykh neftezagryaznennykh allyuvial'nykh lugovykh pochvakh raznogo granulometricheskogo sostava. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*, (1), 60-65. (in Russ.).
12. FR.1.39.2006.02264. Metodika vypolneniya izmerenii vskhozhesti semyan i dliny kornei prorostkov vysshikh rastenii dlya opredeleniya toksichnosti tekhnogenno zagryaznennykh pochv (2009). St. Petersburg. (in Russ.).
13. Shagidullin, R.R., Petrov, A.M., Ivanov, D.V., Tarasov, O.Yu., Shagidullina, R.A., & Bufatina, M.A. (2011). Metodicheskie podkhody k normirovaniyu soderzhaniya nefiti i produktov ee transformatsii v pochvakh. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, (6), 24-286. (in Russ.).
14. Adam, G., & Duncan, H. (2002). Influence of diesel fuel on seed germination. *Environmental pollution*, 120(2), 363-370. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00119-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00119-7)
15. Allamin, I. A., Halmi, M. I. E., Yasid, N. A., Ahmad, S. A., Abdullah, S. R. S., & Shukor, Y. (2020). Rhizodegradation of petroleum oily sludge-contaminated soil using *Cajanus cajan* increases the diversity of soil microbial community. *Scientific reports*, 10(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60668-1>
16. Alotaibi, F., Hijri, M., & St-Arnaud, M. (2021). Overview of Approaches to Improve Rhizoremediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soils. *Applied Microbiology*, 1(2), 329-351. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol1020023>
17. Dmitrieva, T.V. (2008). Phytoremediation of Oil-Sludge-Contaminated Soil. *International Journal of Phytoremediation*, 10(6), 486-502. <https://doi.org/10.1080/15226510802114920>
18. Euliss, K., Ho, C. H., Schwab, A.P., Rock, S., & Banks, M.K. (2008). Greenhouse and field assessment of phytoremediation for petroleum contaminants in a riparian zone. *Bioresource technology*, 99(6), 1961-1971. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.055>

19. Gamage, S.S. W., Masakorala, K., Brown, M.T., & Gamage, S.M.K. W. (2020). Tolerance of *Impatiens balsamina* L., and *Crotalaria retusa* L. to grow on soil contaminated by used lubricating oil: A comparative study. *Ecotoxicology and environmental safety*, 188, 109911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109911>
20. Haider, F.U., Ejaz, M., Cheema, S.A., Khan, M.I., Zhao, B., Liqun, C., ... & Mustafa, A. (2021). Phytotoxicity of petroleum hydrocarbons: Sources, impacts and remediation strategies. *Environmental Research*, 197, 111031. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111031>
21. Hoang, S.A., Lamb, D., Seshadri, B., Sarkar, B., Cheng, Y., Wang, L., & Bolan, N.S. (2021). Petroleum hydrocarbon rhizoremediation and soil microbial activity improvement via cluster root formation by wild proteaceae plant species. *Chemosphere*, 275, 130135. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130135>
22. Huybrechts, M., Cuypers, A., Deckers, J., Iven, V., Vandionant, S., Jozefczak, M., & Hendrix, S. (2019). Cadmium and plant development: an agony from seed to seed. *International journal of molecular sciences*, 20(16), 3971. <https://doi.org/10.3390/ijms20163971>
23. Kondrashina, V., Strijakova, E., Zinnatshina, L., Bocharnikova, E., & Vasilyeva, G. (2018). Influence of activated carbon and other additives on bioremediation rate and characteristics of petroleum-contaminated soils. *Soil Science*, 183(4), 150-158. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000234>
24. Mukome, F.N., Buelow, M.C., Shang, J., Peng, J., Rodriguez, M., Mackay, D.M., ... & Parikh, S.J. (2020). Biochar amendment as a remediation strategy for surface soils impacted by crude oil. *Environmental Pollution*, 265, 115006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115006>
25. Muratova, A.Y., Dmitrieva, T.V., Panchenko, L.V., & Turkovskaya, O.V. (2008). Phytoremediation of oil-sludge-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 10(6), 486-502. <https://doi.org/10.1080/15226510802114920>
26. Panchenko, L., Muratova, A., & Turkovskaya, O. (2017). Comparison of the phytoremediation potentials of *Medicago falcata* L. and *Medicago sativa* L. in aged oil-sludge-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), 3117-3130. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8025-y>
27. Prabakaran, K., Li, J., Anandkumar, A., Leng, Z., Zou, C.B., & Du, D. (2019). Managing environmental contamination through phytoremediation by invasive plants: A review. *Ecological Engineering*, 138, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.07.002>
28. Vasilyeva, G.K., Kondrashina, V.S., Strijakova, E.R., & Pinsky, D.L. (2020). Express-phytotest for choosing conditions and following process of soil remediation. *Environmental Geochemistry and Health*, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00727-8>

дата поступления: 25.08.2021

дата принятия: 03.12.2021

© Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Игнатьев Ю.А., 2022