

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*



**Гальцова Анастасия Дмитриевна**

**Агрохимическая и экологическая оценка применения  
комплекса минеральных удобрений и растений-ремедиантов при  
рекультивации нефтезагрязненных почв**

4.1.3. Агрохимия, агропочвоведение, защита и карантин растений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре агрохимии и биохимии растений факультета почвоведения МГУ имени М.В.Ломоносова

**Научный руководитель** – *Романенков Владимир Аркадьевич*, доктор биологических наук, профессор РАН

**Официальные оппоненты** – *Гилязов Миннегали Юсупович*, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», Институт агробиотехнологий и землепользования, кафедра агрохимии и почвоведения, профессор

*Соколов Денис Александрович*, доктор биологических наук, ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН, лаборатория рекультивации почв, заведующий лабораторией

*Трофимов Сергей Яковлевич*, доктор биологических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», факультет почвоведения, кафедра химии почв, профессор

Защита диссертации состоится «26» ноября 2024 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.015.2 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д.1, стр. 12, биологический факультет, ауд. М-1.

E-mail: [nvkostina@mail.ru](mailto:nvkostina@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3151>

Автореферат разослан «23» октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат биологических наук



Н.В. Костина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Загрязнение почв нефтью и нефтепродуктами является серьезной экологической проблемой, требующей комплексного подхода для ее решения. Поллютанты попадают в окружающую среду из различных источников, возникающих в результате антропогенной деятельности: из-за случайных разливов в результате добычи, переработки или транспортировки нефти и нефтепродуктов (НП). Попадая в почву, НП изменяют естественное экологическое равновесие, морфологические характеристики и физико-химические свойства почвы. Нарушается устойчивость природных экосистем и появляется угроза для их безопасного функционирования (Звягинцев и др., 1986, Пиковский, 1993; Габбасова, Абдрахманов, 1997; Гилязов, 1999).

На настоящий момент активно разрабатываются технологии ремедиации нефтезагрязнённых (НЗ) земель. Особое внимание уделяется разработке биологических методов рекультивации, безвредных для окружающей среды и особенно привлекательных из-за их невысокой стоимости и относительно простой реализации (Mirsal, 2008; O'Brien et al., 2017, Манучарова и др., 2021; Созина, Данилов, 2023; Трофимов и др., 2023).

Среди большого разнообразия механизмов можно выделить биодegradацию и фиторемедиацию. В первом случае используется потенциал каталитической активности автохтонных микробных сообществ для биологического разложения углеводородов нефти, во втором - растительности и связанных с ней микроорганизмов для удаления и обезвреживания загрязняющих веществ из почвенной среды (Hesnawi, Adbeib, 2013; Varjani, 2017; Varjani, Upasani, 2017; Diab, 2008; Gerhardt, 2017; Guarino et al., 2017; Garcia-Sanchez et al., 2018; Abdullah et al., 2020). В ряде исследований отмечается значительный синергетический эффект взаимодействия микроорганизмов и растений в ризосфере (Ying et al., 2011; Al-Baldawi et al., 2017), который может быть связан с увеличением адсорбционной способности корней или повышением биодоступности питательных элементов в ризосфере для микроорганизмов (White, 2001; Glick, 2003, 2010).

Ключевым аспектом данных методов может стать использование агрохимических средств для оптимизации условий питания и развития как растений, так и автохтонных микроорганизмов в почве (Hesnawi, Adbeib, 2013; Suja et al., 2014; Wu et al., 2016, 2020). Использование минеральных удобрений позволяет улучшить характеристики среды обитания растений и микробиоты, стимулируя их биологическую активность и усиливая процессы деградации углеводородов нефти.

**Цель и задачи.** Целью настоящей работы было изучение возможностей оптимизации агрохимических свойств НЗ почв путем применения различных форм азотных удобрений для повышения эффективности растений-ремедиантов и автохтонных микроорганизмов-нефтедеструкторов.

**В задачи исследования** входило:

- 1) определение влияния НЗ на агрохимические свойства почвы;
- 2) оценка воздействия поллютанта на рост и развитие растений-ремедиантов;

- 3) определение влияния НЗ на биологические свойства почвы;
- 4) определение изменения остаточного содержания НП в почве под влиянием агрохимических средств и фиторемедиантов;
- 5) оценка супрессивности НЗ почвы с использованием метода биотестирования;
- 6) выбор показателей, наиболее эффективно отражающих процессы восстановления почвы.

**Научная новизна.** Впервые показано, что в наибольшей степени различия в эффективности деструкции нефти в почве и развитии биомассы растений-ремедиантов определяются комплексом биологических показателей, влияние которых опосредуется буферными свойствами почвы. Это влияние определяет качественный состав растений для чернозема типичного; для олиготрофной торфяной почвы, он в большей степени зависит от агрохимических свойств почвы и условий произрастания растений.

Впервые предложены наиболее эффективные формы азотных удобрений для каждого изученного типа почв на основе комплекса 15-ти показателей, характеризующих агрохимические и биологические свойства почв, их ферментативную активность, эффективность деструкции нефти в почве, а также продуктивность и химический состав трав-ремедиантов.

Впервые применена методика оценки супрессивности нефтезагрязненной почвы с использованием метода биотестирования. Были определены реакции системы почва-растения-фитопатоген в условиях нефтезагрязнения.

**Теоретическая и практическая значимость.** Сравнительная оценка влияния различных форм азотных удобрений позволяет выбрать наиболее эффективные из них для улучшения условий развития растений-ремедиантов и автохтонных нефтеструктуров в почве. Оптимизация применения агрохимических средств в технологиях фиторемедиации и биодеградациии позволяет повысить их эффективность на нефтезагрязненных почвах. Проведённое исследование дает возможность разработки научно-обоснованного регламента по применению агрохимических средств на основе анализа комплекса агрохимических и биологических свойств почвы.

**Методология и методы исследования.** Методология исследования основывается на использовании вегетационного опыта, проводимого ежегодно в течении трех лет. В работе использован комплекс агрохимических и микробиологических методов и подходов. Полученные результаты подвергались статистической обработке.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Комплексное влияние минеральных удобрений на процессы фиторемедиации НЗ почвы достигнуто за счёт улучшения характеристики среды обитания трав-ремедиантов и автохтонной микробиоты, стимуляции их биологической активности.
2. Снижение содержания НП активизировалось изменением формы азотных удобрений, в наибольшей степени - при использовании аммонийно-нитратной формы на торфяной олиготрофной почве и нитратной - на черноземе типичном.
3. Оптимизация агрохимического фона с помощью минеральных удобрений повышает активность уреазы, фосфатазы и каталазы в 2-3 раза и увеличивает количество ДНК бактерий и архей до 2 раз по сравнению с незагрязнённой почвой.

4. На эффективность деструкции нефти в почве и развитие растений-ремедиантов максимальное влияние оказали биологические свойства почвы, влияние которых опосредовалось её буферными свойствами.

5. Разработан комплекс из 15 показателей, характеризующих агрохимические и биологические свойства почв, как перспективный для разработки научно-обоснованного регламента по применению агрохимических средств и выбора наиболее эффективных форм азотных удобрений.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность работы обусловлена большим объемом аналитического материала, использованием классических и современных подходов и методов. Вегетационные опыты и аналитические исследования проводились в трехкратной повторности. Все лабораторные и аналитические исследования проводились на современном оборудовании. Анализ и обобщение данных проводили с использованием современных методов статистической обработки экспериментальных данных.

**Личный вклад автора** Вклад автора состоял в организации и проведении всех исследований, предполагаемых программой работы. Автор непосредственно участвовал во всех вегетационных опытах и аналитических исследованиях, проанализировал и интерпретировал полученные экспериментальные данные, выполнил их статистическую обработку, подготовил текст и иллюстрации для публикации.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 4 печатные работы: из них 4 статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых международными базами данных (Web of Science и Scopus), рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В.Ломоносова. В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

**Объем и структура работы.** Диссертация изложена на 157 страницах и состоит из введения, 3 глав, заключения, выводов и приложений. Диссертационная работа содержит 59 таблиц, 43 рисунка и список литературы из 237 наименований, из которых 117 на английском языке.

**Благодарности** Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, профессору, д.б.н. Романенкову Владимиру Аркадьевичу за помощь и ценные советы во время выполнения диссертационной работы. Автор выражает отдельную благодарность доценту, к.б.н. Арзамазовой Анне Вадимовне за помощь в проведении практического этапа исследования. Автор выражает признательность сотрудникам кафедры агрохимии и биохимии растений, к.б.н. Кинжаеву Р.Р. и к.б.н. Павлову К.В. за помощь в выполнении работы. Также, автор благодарит сотрудника кафедры биологии почв, д.б.н. Манучарову Н.А. за помощь в проведении исследований численности прокариот в почве. Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры химии почв, к.б.н. Розановой М.С. и к.б.н. Карпухину М.М., за помощь в определении остаточного содержания НП в почве. Автор также выражает благодарность сотруднику

кафедры биологии почв, к.б.н. Ивановой А.Е. за помощь в анализе супрессивности почвы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Обзор литературы

В главе собрана информация о влиянии НЗ на физические, химические и биологические свойства почв. Подробно рассматриваются результаты воздействия нефти и НП на рост и развитие растений, произрастающих в условиях техногенного стресса. Описываются изменения ферментативной активности почв под влиянием НЗ. Отдельное внимание уделено описанию концепции супрессивности почвы, как интегральному показателю в оценке ее здоровья. Подробно разбирается понятие «супрессивности», а также приводятся используемые подходы, методы и тест-системы для исследования супрессирующей способности почв. Проводится анализ наиболее часто используемых показателей для оценки состояния НЗ почв.

### Глава 2. Объекты и методы исследования

**Объекты исследования.** В качестве объектов исследования были выбраны пахотные горизонты почв 2 типов: торфяная олиготрофная и чернозем типичный. Образцы почв отбирались в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017. Образцы *олиготрофной торфяной почвы*, загрязненной и незагрязненной нефтью были отобраны Среднем Приобье, на территории Ханты-Мансийского автономного округа. Почвы исследованного участка относятся к типу торфяных олиготрофных, отделу торфяных почв по классификации 2004 г. (Классификация и диагностика почв России, 2004), Ombric Distric Fibric Histosol по WRB-2014 г. (World Reference Base for Soil Resources, 2014). Исследуемая олиготрофная почва была загрязнена в результате техногенной аварии в природной экосистеме, срок загрязнения приблизительно 1 год. На территории, с которой отбирались образцы, был проведен технический этап рекультивации. Образцы незагрязненного *чернозема типичного* были отобраны из верхней части гумусово-аккумулятивного горизонта типичного чернозема (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)) в Воронежской области, Таловском районе из старовозрастной лесополосы №40 Каменной степи, длительное время не находящейся в сельскохозяйственном использовании. Для загрязнения основного объема чернозема типичного в соответствии со схемой эксперимента использовался предварительно искусственно загрязненный образец почвы.

Образцы торфяной почвы к моменту закладки опыта были предварительно известкованы по 0,5 Нг и по степени кислотности относились к категории «близкие к нейтральным» (табл. 1). Чернозем характеризовался как нейтральный по степени кислотности.

**Таблица 1.** Агрохимическая характеристика незагрязненных почв

Почва	Гумус, %	pH <sub>KCl</sub>	H <sub>г</sub> , моль/100 г	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	K <sub>2</sub> O, мг/кг
Торфяная олиготрофная	-	5,7 ± 0,3	124,6	113 ± 12	198 ± 16
Чернозем типичный	8,1 ± 0,3	6,4 ± 0,1	-	27 ± 3	11 ± 2

В качестве тест-объекта была использована **рекультивационная смесь злаковых трав** следующего состава: тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.) – 40%; кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub.) – 30 %; овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.) – 30%.

Формирование оптимальных почвенных условий для роста растений и деятельности автохтонных микроорганизмов в почве производилось внесением **минеральных удобрений**, содержащих основные элементы питания (NPK). За счет использования разных форм азотных удобрений создавались разные условия питания (табл. 2), так как азот всегда выступает лимитирующим фактором для жизнедеятельности растений и микроорганизмов, особенно в условиях техногенного загрязнения нефтью и НП (Назаров, 2007; Смирнова, Панина, 2015; Гальцова, 2019). Дополнительное внесение фосфорных и калийных удобрений было необходимо для создания запланированного уровня обеспеченности.

**Таблица 2.** Применяемые удобрения

Условное обозначение варианта опыта	Используемое удобрение		
	Азотное	Фосфорное	Калийное
НаммРК	Аммоний фосфорнокислый двузамещенный	Суперфосфат простой	Хлорид калия
НнитрРК	Нитрат калия		
НаммНнитрРК	Нитрат аммония		

Для расчета доз удобрений, вносимых в почвы, использовались соответствующие группировки почв по обеспеченности растений элементами минерального питания. Для торфяной олиготрофной почвы с помощью удобрений создавался повышенный уровень обеспеченности растений элементами минерального питания, для чернозема типичного - средний (табл. 3).

**Таблица 3.** Дозы удобрений

Почва	Уровень обеспеченности	Доза удобрений, мг д.в./кг почвы
Олиготрофная торфяная	Повышенный	N <sub>400</sub> P <sub>500</sub> K <sub>650</sub>
Чернозем типичный	Средний	N <sub>30</sub> P <sub>75</sub> K <sub>60</sub>

**Описания экспериментов.** При проведении исследования в 2020-2022 годах была заложена серия вегетационных опытов на базе вегетационного домика факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова (табл. 4).

В рамках исследования создавалось два уровня загрязнения почв нефтью. Выбранные дозы загрязнения лежат ниже границы значений, при которых целесообразно начинать биологический этап ремедиации загрязненных земель для исследуемых типов почв.

Для торфяной почвы были выбраны дозы, условно обозначенные как 100 г и 150 г нефти на кг почвы. Для чернозема - 5 г и 7 г нефти на кг почвы. Подобные уровни

содержания НП являются типичными для проведения этапа фитомелиорации (Швец, 2009). Все исследуемые дозы соответствует высокому уровню загрязнения согласно «Методическим рекомендациям по выявлению деградированных и загрязненных земель» (1995).

Оптимизация агрохимического фона производилась путем внесения удобрений. Опыт проводился в вегетационных сосудах вместимостью 2 л. Посев семян тест-культур производился из расчета нормы высева 80 кг/га. После окончания вегетационного периода произведена срезка полученной биомассы растений и отобраны образцы почв для дальнейших аналитических исследований. Агрохимические свойства почв, продуктивность и качественный состав трав-ремедиантов оценивались по окончании вегетационного опыта. Данные представляют собой средние за три вегетационных периода по три повторности в каждом году.

**Таблица 4.** Схема опыта

Доза загрязнения	Форма удобрения	Условное обозначение варианта опыта
<b>Почва - олиготрофная торфяная</b>		
Контроль незагрязненный (КН)	Контроль без удобрений	КН
	НаммРК	КН + НаммРК
	НнитрРК	КН + НнитрРК
	НаммНнитрРК	КН + НаммНнитрРК
100 г нефти/кг почвы	Контроль без удобрений	Контроль + 100 г нефти
	НаммРК	100 г нефти + НаммРК
	НнитрРК	100 г нефти + НнитрРК
	НаммНнитрРК	100 г нефти + НаммНнитрРК
150 г нефти/кг почвы	Контроль без удобрений	Контроль + 150 г нефти
	НаммРК	150 г нефти + НаммРК
	НнитрРК	150 г нефти + НнитрРК
	НаммНнитрРК	150 г нефти + НаммНнитрРК
<b>Почва - чернозем типичный</b>		
Контроль незагрязненный (КН)	Контроль без удобрений	КН
	НаммРК	КН + НаммРК
	НнитрРК	КН + НнитрРК
	НаммНнитрРК	КН + НаммНнитрРК
5 г нефти/кг почвы	Контроль без удобрений	Контроль + 5 г нефти
	НаммРК	5 г нефти + НаммРК
	НнитрРК	5 г нефти + НнитрРК
	НаммНнитрРК	5 г нефти + НаммНнитрРК
7 г нефти/кг почвы	Контроль без удобрений	Контроль + 7 г нефти
	НаммРК	7 г нефти + НаммРК
	НнитрРК	7 г нефти + НнитрРК
	НаммНнитрРК	7 г нефти + НаммНнитрРК

**Методы исследования.** Основные агрохимические показатели почв определялись в соответствии с общепринятыми методиками. В соответствующем разделе диссертации представлен список методик агрохимического анализа почв (Минеев, 2001). Содержание НП определялось методом ИК-спектрометрии соответствии с ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Ферментативная активность измерялась следующими методами: активность каталазы- титриметрически по методу Джонсона и Темпле (Хазиев, 2005); активность уреазы - инкубацией навески почвы с раствором мочевины, в присутствии фосфатного буфера (Хазиев, 2005); активность фосфатазы - при естественном рН почвы с использованием  $\beta$ -глицерофосфата натрия (Минеев, 2001).

Определение количества копий генов бактерий и архей проводилось с применением метода количественной ПЦР в реальном времени с использованием универсальной праймерной системы.

**Определение супрессивности почвы.** Определение супрессивности почвы производилось по окончании вегетационного опыта в трехкратной повторности в соответствии со схемой опыта (табл. 5).

**Таблица 5.** Схема исследования супрессивности

Доза загрязнения	Внесение патогена	Условное обозначение варианта	Доза загрязнения	Внесение патогена	Условное обозначение варианта
Почва - <i>олиготрофная торфяная</i>			Почва - <i>чернозем типичный</i>		
Контроль незагрязненный	нет	КН	Контроль незагрязненный	нет	КН
	да	КН + П		да	КН + П
100 г нефти/кг почвы	нет	100 г нефти	5 г нефти/кг почвы	нет	5 г нефти
	да	100 г нефти + П		да	5 г нефти + П
150 г нефти/кг почвы	нет	150 г нефти	7 г нефти/кг почвы	нет	7 г нефти
	да	150 г нефти + П		да	7 г нефти + П

Исследование супрессирующей способности почв проводилось по методике, основанной на принципе биотестирования (Maurhofer, 1992; Erhart et al., 1999; Tamm et al., 2010). В качестве модельной системы для тестирования устойчивости почвы к патогенам были выбраны фитопатоген *Fusarium solani* и яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта “Злата”.

Исследования проводились в стерильных чашках Петри, которые заполняли предварительно подготовленными образцами почв. После этого почвы оставлялись на сутки при комнатной температуре для активации микробного комплекса. Затем каждую чашку инокулировали *Fusarium solani* путем внесения необходимого количества суспензии, содержащей споры этого микромицета в концентрации  $1 \cdot 10^5$  спор/мл. После инокуляции чашки Петри закрывались крышками и помещались в климатическую камеру с постоянной температурой 25°C на 7 дней для проращивания спор микромицета. Затем в каждую чашку помещалось по 20 семян яровой пшеницы, предварительно отсортированных по размеру. Почва помещалась в климатическую камеру и семена проращивались в течении 5 дней при температуре 22°C и при

искусственном освещении 5000 лк продолжительностью 12 часов в сутки. Результаты эксперимента были подсчитаны по истечении 5 дней. Оценивалась всхожесть семян и длина главного корня проростков с точностью до 1 мм. Для каждого варианта подсчитывалось среднее значение всхожести семян и длины корней по трем измерениям.

**Статистическая обработка данных.** Статистическая обработка данных проводилась с помощью стандартных пакетов Microsoft Excel 2016 и Statistica 10. Анализ главных компонент (Principal Component Analysis (PCA, ГК)) проводился в программе Microsoft Excel 2016 с использованием надстройки XLSTAT от Addinsoft.

### **Глава 3. Результаты и обсуждение**

#### **3.1 Влияние минеральных удобрений на агрохимические свойства НЗ почв**

НЗ не оказало влияния на реакцию почвенного раствора исследуемых почв. Снижение значений рН на загрязненных почвах было статистически не значимым.

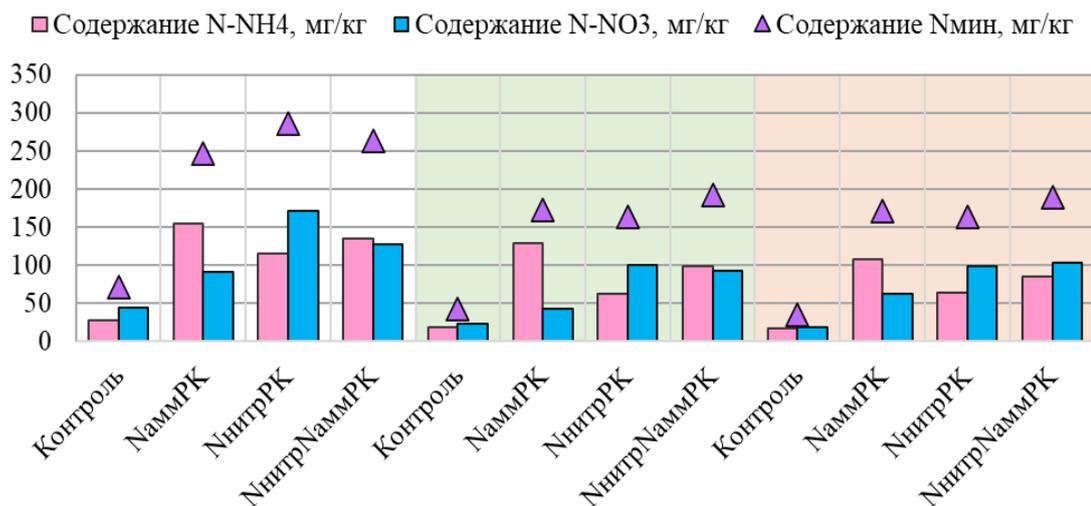
Изменение агрохимических свойств почв в результате НЗ - часто диагностируемый результат техногенных аварий (Пиковский, 1988; Khan et al., 2018a). Негативное действие нефтяного загрязнения, отмеченное и в нашем исследовании, выразилось в уменьшении содержания минеральных форм азота, подвижного фосфора и калия.

В ходе исследования были получены данные, подтверждающие значимое снижение содержания минерального азота в почвах. Негативный эффект воздействия нефти наблюдался как на торфяной почве, так и на черноземе типичном. Однако, интенсивность влияния загрязнения на торфяной почве была в среднем на порядок выше, чем на черноземе типичном.

Основываясь на литературных данных, можно предположить, что снижение количества минерального азота в НЗ почвах связано с резким сужением C:N при попадании поллютанта в почву (Габбасова и др., 1997; Смирнова, Панина, 2015; Назарюк, Калимуллина, 2020). При этом активнее начинает использоваться азот внесенных минеральных удобрений, в первую очередь, более доступной его формы - нитратного азота. Это подтверждается тем, что в НЗ почвах изменяется соотношение  $N_{NH_4}:N_{NO_3}$  в сторону преобладания аммонийной формы азота.

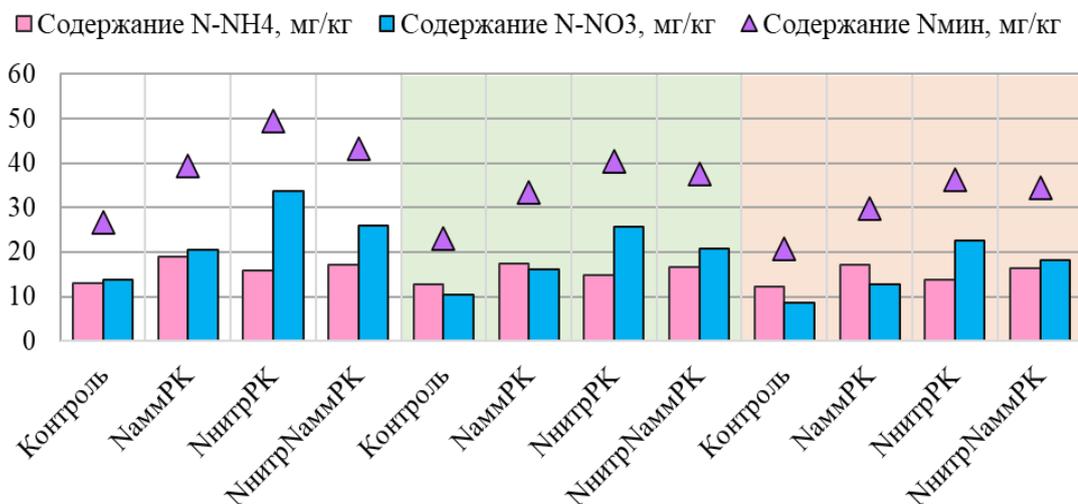
Количество минерального азота в нефтезагрязненной *олиготрофной торфяной почве* достоверно снижалось по сравнению с контролем - на 41% при загрязнении в дозе 100 г/кг и на 50% при большей дозе поллютанта (рис. 1). На фоне загрязнения нефтью произошло изменение соотношения содержания аммонийного и нитратного азота в торфяной почве.

Применение удобрений позволило нивелировать негативное влияние нефти в олиготрофной торфяной почве, особенно при использовании совместно нитратной и аммонийной форм в варианте «НаммNнитрPK». Внесение совместно обеих форм позволяет добиться практически равного, сбалансированного соотношения  $N_{NH_4}:N_{NO_3}=1:0,9$  во всех вариантах опыта. Следует отметить, что оптимизация условий питания растений также привела к сглаживанию различий между разными дозами загрязнения до 0,6-2%.



**Рисунок 1.** Содержание минерального, нитратного и аммонийного азота в олиготрофной торфяной почве, мг/кг; цветными зонами на графике обозначены варианты, загрязненные нефтью: зеленая – 100 г нефти/кг почвы; оранжевая – 150 г нефти/кг почвы

Количество минерального азота в *черноземе типичном* в вариантах без применения удобрений уменьшилось на 14-22% при загрязнении почвы нефтью (рис. 2).



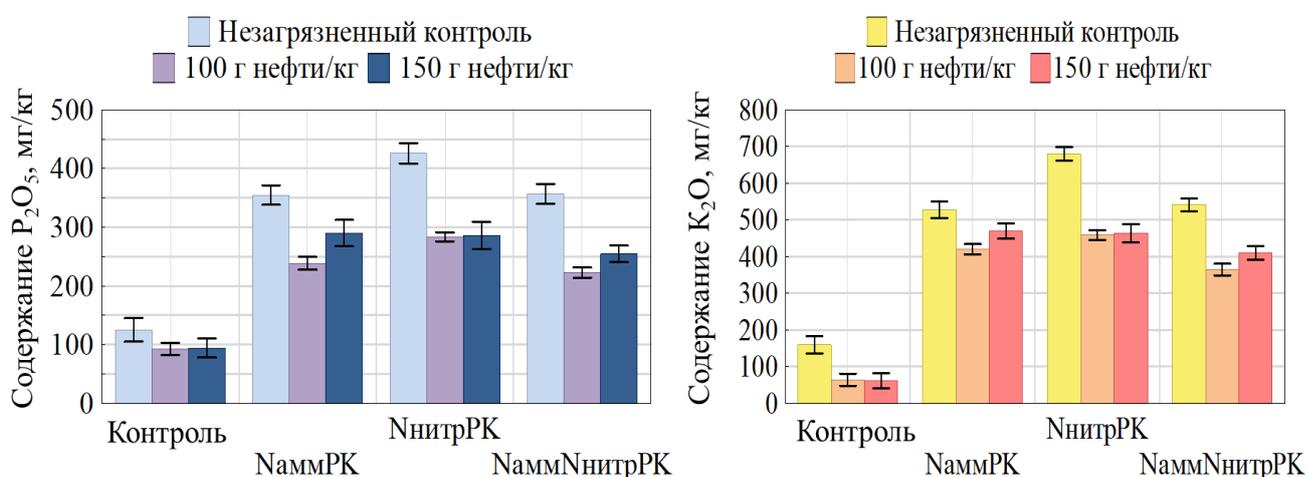
**Рисунок 2.** Содержание минерального, нитратного и аммонийного азота черноземе типичном, мг/кг; цветными зонами на графике обозначены варианты, загрязненные нефтью: зеленая зона – 5 г нефти/кг почвы; оранжевая зона – 7 г нефти/кг почвы

Воздействие поллютанта приводило к некоторым изменениям в соотношении N<sub>NH<sub>4</sub></sub>:N<sub>NO<sub>3</sub></sub> в черноземе типичном в сторону преобладания аммонийной формы азота. Во всех изученных почвах НЗ оказало более сильное негативное влияние на содержание нитратного азота в почве, по сравнению с аммонийным азотом. Вероятнее всего, это связано с заметным ухудшением условий аэрации, преобладанием восстановительных процессов и, как следствие, общим снижением интенсивности процессов нитрификации в НЗ почвах (Габбасова и др., 1997; Смирнова, Панина, 2015).

Внесение минеральных азотсодержащих удобрений привело к закономерному увеличению количества минерального азота в черноземе типичном. Наибольшую эффективность при этом показывает внесение удобрения, содержащего нитратную форму азота. Отмечено также, что удобрения оказывали более интенсивное действие на вариантах с большей дозой загрязнения почв нефтью (7 г/кг).

Снижение содержания в почвах подвижного фосфора и калия также связано с загрязнением почвы нефтью. Подвижность этих элементов в профиле почвы и доступность для растений сильно снижается в почвах, загрязненных нефтью и НП, что отмечено другими исследователями (Okonokhua et al, 2010; Wang et al., 2013). Это связано с изменением водно-физических и химических свойств почв в результате обволакивания почвенных частиц пленками нефти.

Нефтезагрязненная *олиготрофная торфяная почва* содержала на 24-26% меньше подвижного фосфора по сравнению с незагрязненным контролем (рис. 3).

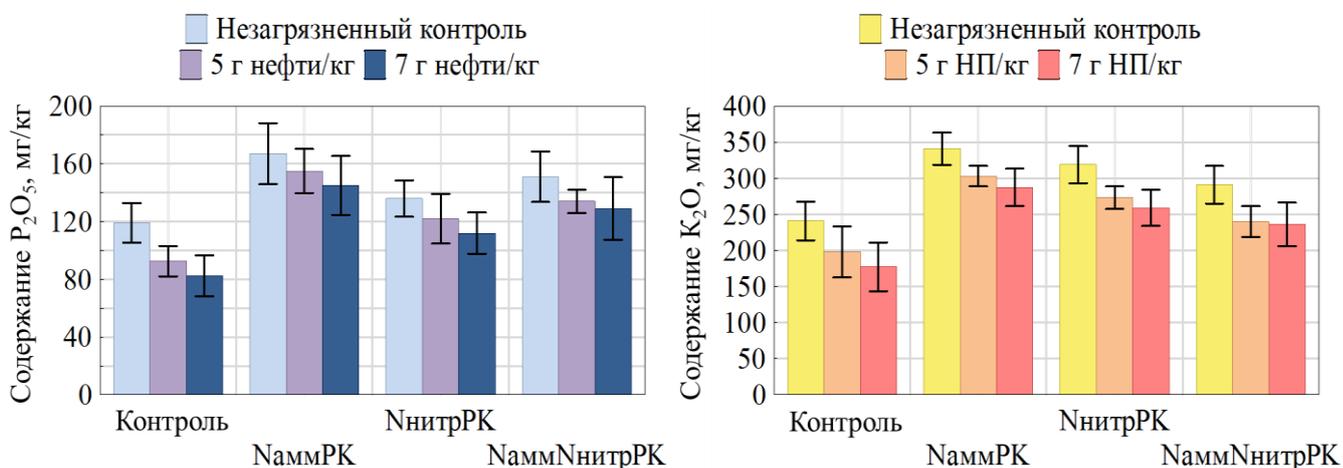


**Рисунок 3.** Содержание подвижного фосфора и обменного калия в торфяной олиготрофной почве, мг/кг (среднее  $\pm$  95% доверит. интервал)

Содержание подвижного фосфора в незагрязненной торфяной почве по окончании опыта характеризовалось как низкое, а под воздействием нефти снизилось до уровня очень низкое. Внесение удобрений привело к повышению содержания этого элемента в торфяной почве до уровня «повышенный» в незагрязненных вариантах опыта и до уровня «средний» в загрязненных. Содержание подвижного фосфора было максимальным при всех уровнях загрязнения в случае применения только нитратной формы азотных удобрений (вариант «КН + НнитрПК»).

НЗ привело к значимому снижению содержания обменного калия в торфяной почве - на 60% и 62% в тех вариантах, где не применялись удобрения (рис. 3). Внесение удобрений на незагрязненном варианте привело к повышению содержания обменного калия на 230-325%. На загрязненных почвах действие удобрений было более значительным - содержание данного макроэлемента увеличилось значительно - на 467- 664%. На фоне применения удобрений интенсивность негативного воздействия нефти снизилась, а содержание обменного калия повысилось в 3-4 раза в незагрязненной почве и в 4-7 раз в аналогичных загрязненных вариантах.

В *черноземе типичном* содержание подвижного фосфора в незагрязненной почве характеризовалось как повышенное. НЗ привело к снижению содержания фосфора на одну градацию, до среднего уровня. На вариантах без применения удобрения почвы, загрязненные нефтью в дозе 5 г/кг, содержали на 22% меньше подвижного фосфора по сравнению с незагрязненным контролем, а почвы, загрязненные большей дозой нефти - на 31% меньше (рис. 4).



**Рисунок 4.** Содержание подвижного фосфора и обменного калия в черноземе типичном, мг/кг (среднее  $\pm$  95% доверит. интервал)

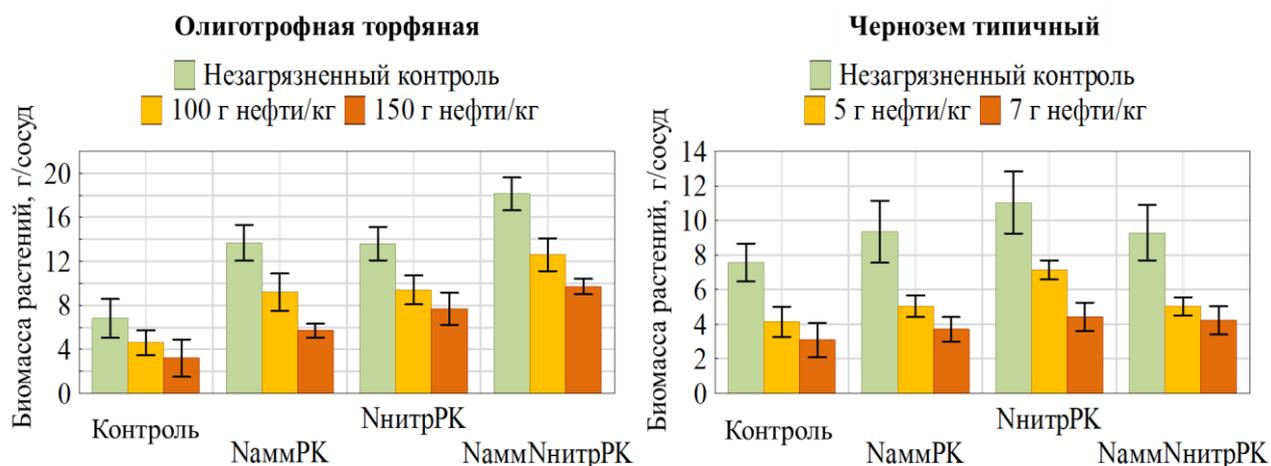
Применение удобрений на черноземе позволило частично компенсировать негативное действие загрязнения и увеличить содержание подвижного фосфора на 14-40% до повышенного уровня в загрязненных вариантах. Максимальное содержание этого элемента отмечено на варианте «КН + НаммПК». Содержание обменного калия на черноземе было не столь сильно подвержено негативному действию нефти (рис. 4). Значимые различия в воздействии двух доз загрязнения на содержание обменного калия не были обнаружены.

### 3.2 Влияние минеральных удобрений на рост и развитие трав-ремедиантов при нефтезагрязнении

Снижение продуктивности растений, произрастающих в условиях загрязнения - наиболее часто диагностируемый результат действия нефти и НП (Сулонов, 2012а, 2012б; Yan, 2015; Xie, 2018). В нашем исследовании отмечено значительное негативное воздействие загрязнения на продуктивность трав-ремедиантов как на олиготрофной торфяной почве, так и на черноземе типичном (рис. 5). Все исследуемые дозы загрязнения оказали значимое влияние на данный показатель.

На контрольной *олиготрофной торфяной почве*, в вариантах без внесения удобрений, на фоне НЗ зафиксировано достоверно значимое снижение биомассы растений на 32-53% по сравнению с незагрязненным вариантом. На незагрязненном *черноземе типичном* на тех вариантах, где не проводилось оптимизации условий питания растений, биомасса трав была на 83-146% выше по сравнению с аналогичными загрязненными вариантами. Отмечается наличие достоверной ( $p < 0,05$ ) отрицательной

корреляции между продуктивностью растений и остаточным содержанием нефти в почве: для торфяной почвы  $r = -0,66$ , для чернозема  $r = -0,91$ .



**Рисунок 5.** Надземная воздушно-сухая биомасса растений на олиготрофной торфяной почве и черноземе типичном, г/сосуд (среднее  $\pm$  95% доверит. интервал)

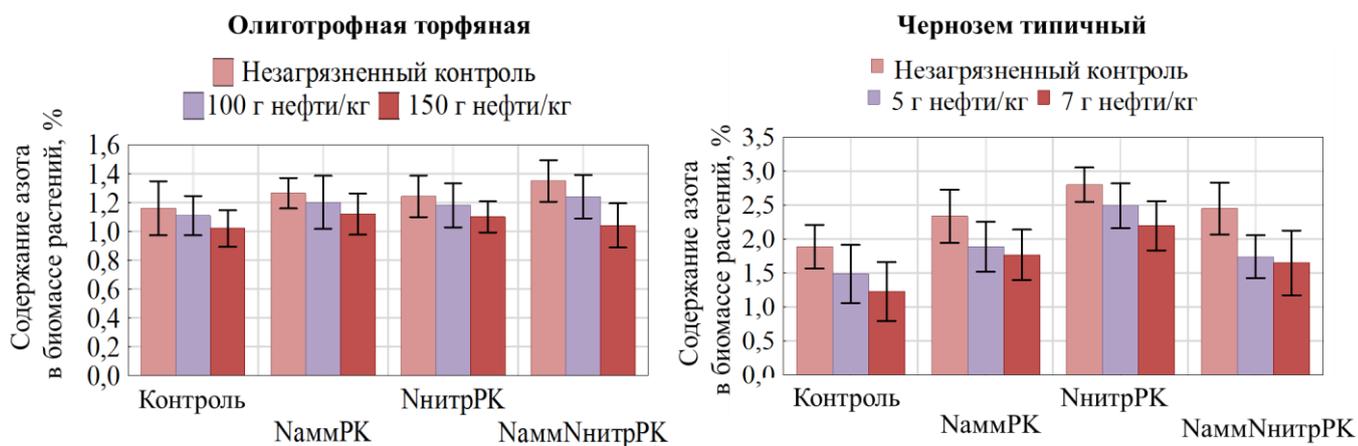
Действие нефти на продуктивность трав-ремедиантов, вероятнее всего, было связано с изменением физико-химических условий среды под влиянием поллютанта. Подобный эффект приводит к ухудшению условий питания растений, снижая доступность элементов минерального питания вследствие обволакивания почвенных частиц нефтяными пленками, препятствующими переходу питательных веществ в почвенный раствор (Исмаилов, 1988, Киреева, 2009; Кольцова 2014; Хазиев, 1988; Soleimani, 2010).

Другой механизм может связан с деятельностью микроорганизмов в почве. Увеличение соотношения C:N при попадании нефти в почву приводит к иммобилизации элементов минерального питания растений, делая их недоступными для растений (Xu, Johnson, 1997).

Внесение в почву минеральных удобрений и улучшение условий питания растений закономерно приводило к повышению биомассы растений, что продемонстрировано полученными в ходе исследования данными. На *олиготрофной торфяной почве* прирост биомассы при применении удобрений составил 78-203%. Но продуктивность растений на данной почве была на 31-58% ниже, чем в аналогичных незагрязненных вариантах. Наибольшую продуктивность показали растения, произрастающие на нефтезагрязненной почве, в которую были внесены совместно нитратная и аммонийная формы азота («НаммНнитрПК»).

Внесение удобрений на загрязненном *черноземе типичном* повысило биомассу растений на 20-72%. Максимальная эффективность среди исследуемых форм удобрений оказалась на варианте «НнитрПК». На данном варианте прирост биомассы был в 2 раза выше, чем на вариантах «НаммПК» и «НаммНнитрПК», интенсивность воздействия которых достоверно не различается.

Изучение динамики содержания основных макроэлементов в биомассе растений позволило установить наличие негативного влияния НЗ не только на общую продуктивность растений, но и на изменение качественного состава растений (рис. 6).



**Рисунок 6.** Содержание азота в надземной воздушно-сухой биомассе растений на олиготрофной торфяной почве и черноземе типичном, % (среднее  $\pm$  95% доверит. интервал)

Содержание азота в растениях на *олиготрофной торфяной почве* содержащей нефть в дозе 150 г/кг, значительно снизилось на 12% по сравнению с незагрязненным контролем на вариантах. На почвах, загрязненных меньшим количеством нефти (100 г/кг), снижение содержания азота статистически незначимо (рис. 6). Содержание фосфора в биомассе растений-ремедиантов на торфяной почве снижалось на 10-29% под действием поллютанта, калия - на 4-6%. На содержание фосфора и калия в растениях влияли обе изучаемые дозы нефти - 100 г/кг и 150 г/кг и при возрастании загрязнения содержание фосфора и калия прогрессивно снижалось.

Содержание азота в надземной биомассе растений на *черноземе типичном* (рис. 6), загрязненным 5 г нефти/кг почвы, было ниже на 21% по сравнению с растениями на незагрязненной контрольной почве. Доза поллютанта 7 г/кг привела к большему снижению содержания азота - на 35%. Надземная биомасса растений, выращенных на загрязненном черноземе типичном, содержала на 18-29% меньше фосфора в тех случаях, когда не использовались минеральные удобрения, а калия - на 12-17%. На содержание макроэлементов в биомассе растений на черноземе типичном повлияли обе дозы загрязнения. Однако на содержание азота в растениях варианты «5 г нефти» и «7 г нефти» оказывают одинаковый по интенсивности негативный эффект.

Применение удобрений привело к улучшению условий питания растений, которое выразилось в увеличении содержания указанных выше макроэлементов в биомассе трав. Отдельно следует отметить, что увеличение биомассы растений происходит одновременно с улучшением ее качественного состава, что подтверждается высокой положительной корреляцией между продуктивностью растений и содержанием в них азота, фосфора и калия (табл. 8). Это свидетельствует о важности создания благоприятного агрохимического фона, максимально сбалансированного с точки

зрения количества и форм элементов минерального питания, особенно в условия стресса.

**Таблица 8.** Коэффициенты корреляции между продуктивностью (биомассой) растений и содержанием в них основных макроэлементов (NPK)

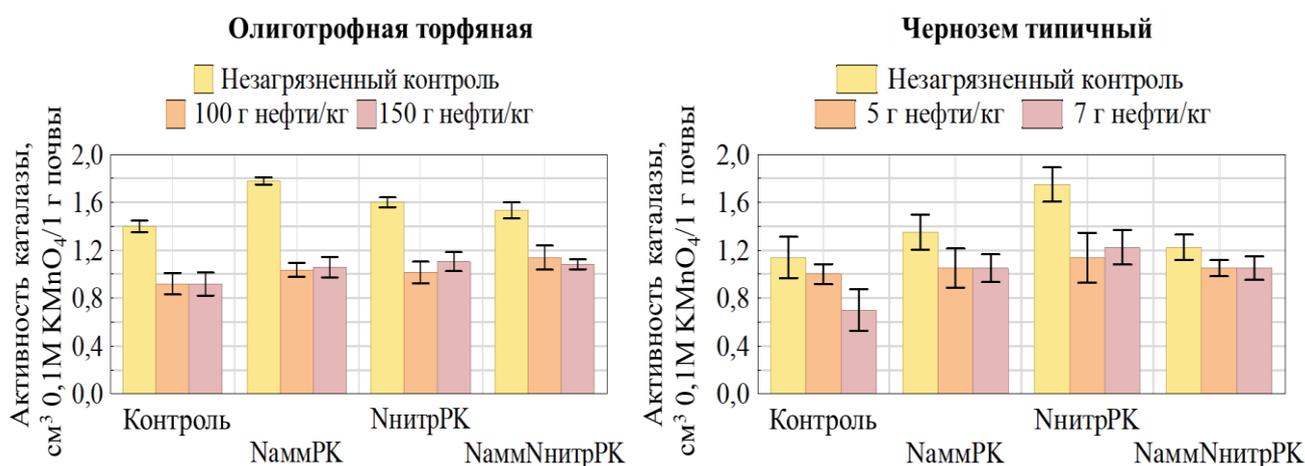
Содержание макроэлемента в биомассе растений, %	Надземная воздушно-сухая биомасса растений, г/сосуд	
	Олиготрофная торфяная почва	Чернозем типичный
Азот (N)	0,78*	0,81*
Фосфор (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,88*	0,79*
Калий (K <sub>2</sub> O)	0,88*	0,74*

\* коэффициенты корреляции значимы на уровне  $p < 0,01$

### 3.3 Влияние минеральных удобрений на ферментативную активность почвы при нефтезагрязнении

Активность ферментов в НЗ почве является наиболее чувствительным и информативным показателем для диагностики наличия деградационных нарушений в экосистеме (Колесников и др., 2006; Новоселова, 2008; Turgay et al., 2010; Смирнова, Панина, 2015), в т.ч. при диагностике уровня нефтяного загрязнения почвы (Сергатенко и др., 2022). Механизм изменений их активности связан как непосредственно с их ингибированием, так и с изменением почвенных условий, трансформацией метаболических процессов в почве.

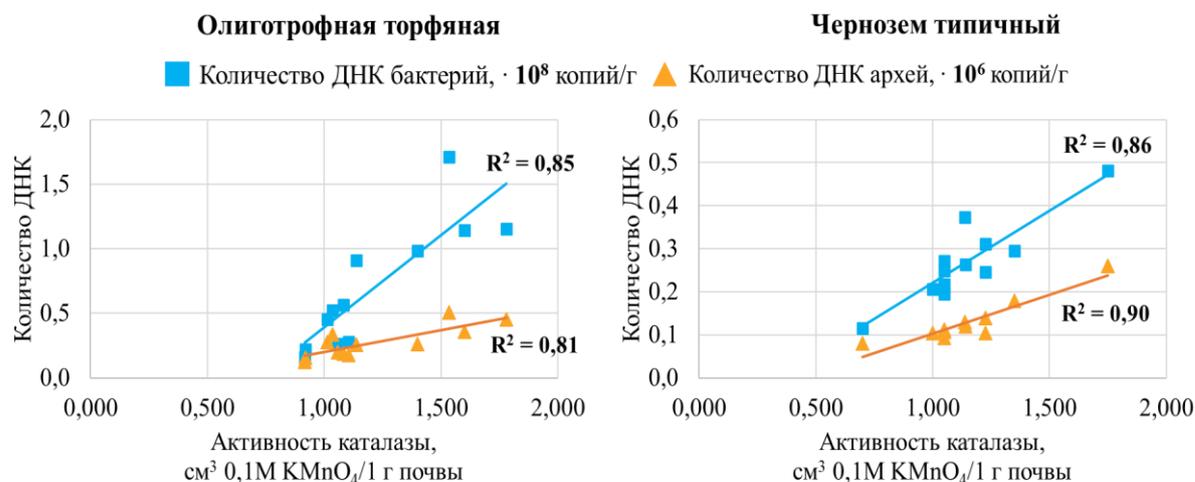
В данном исследовании установлено сильное негативное воздействие НЗ на *активность каталазы* на обоих изучаемых типах почв (рис. 7). Каталазная активность на фоне НЗ была ниже в 1-1,5 раза в торфяной почве и в 1,1-1,4 раза в черноземе.



**Рисунок 7.** Активность каталазы в почве,  $\text{см}^3 0,1\text{M KMnO}_4/1 \text{ г почвы}$  (среднее  $\pm 95\%$  доверит. интервал)

Активность каталазы, как правило, находится в обратной линейной зависимости от содержания нефти и НП в почве (Сулейманов, Назырова 2007; Shen et al, 2016). Аналогичные результаты были получены в нашем исследовании на обоих типах почв. На торфяной почве коэффициент корреляции между остаточным содержанием нефти и активностью каталазы в почве составил  $-0,90$ , а на черноземе  $-0,67$  ( $p < 0,01$ ). Каталазная активность может обнаруживать сходную динамику с общей численностью

микроорганизмов в почве (Новоселова, 2008; Shen et al, 2016). В данном исследовании отмечено наличие высокой положительной корреляции между активностью фермента и количеством ДНК бактерий и архей в почве (рис. 8).



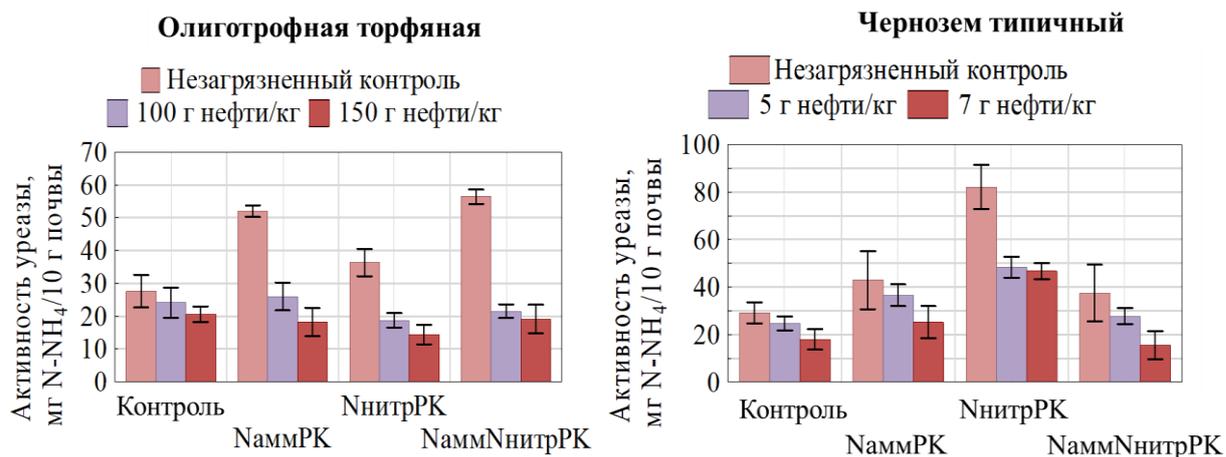
**Рисунок 8.** Корреляция между активностью каталазы и количеством ДНК бактерий и архей в почвах

Удобрения оказали положительное действие на активность каталазы в почвах. На незагрязненных контрольных почвах можно наблюдать положительную динамику активности каталазы на фоне оптимизации агрохимических свойств почв с помощью минеральных удобрений.

В торфяной почве активность каталазы значительно повысилась на 10-27%, а в черноземе - на 18 и 54%. Максимальная активность каталазы в торфяной почве отмечена при внесении удобрений, содержащих азот в аммонийной форме. В черноземе активность каталазы достигала максимума на варианте с внесением нитратной формы азота.

**Уреазная активность** в НЗ почвах, как правило, возрастает вследствие увеличения содержания доступного для организмов углерода или изменения окислительно-восстановительной обстановки в сторону преобладания восстановительных условий (Исмаилов, 1988; Киреева и др., 2001; Новоселова, Киреева, 2014). Однако, в ряде исследований также отмечается снижение активности этого фермента под влиянием НЗ, особенно длительного (Сулейманов, Назырова, 2007; Новоселова, 2008). Аналогичное действие нефти выявлено в данном исследовании (рис. 9).

В черноземе снижение активности уреазы на фоне загрязнения (в 1,2-2,4 раза по сравнению с контролем) было менее интенсивным, чем на олиготрофной почве (в 1,3-3 раза). Это подтверждает более выраженную способность черноземных почв к восстановлению и самоочищению от НЗ, что часто отмечается в научных исследованиях (Колесников и др., 2006; Щемелина, 2008; Коротченко, Кириенко, 2014).



**Рисунок 9.** Активность уреазы в почвах, мг N-NH<sub>4</sub>/10 г почвы (среднее ± 95% доверит. интервал)

Оптимизация агрохимических свойств почвы приводила к значимому увеличению активности уреазы в торфяной почве только на нефтезагрязненном контроле (КН) на 88-104% в вариантах, где применялись удобрения, содержащие аммонийную форму азота - варианты «НаммРК» и «НаммНнитрРК». На фоне НЗ удобрения не привели к значимому изменению активности уреазы в торфяной почве. Внесение удобрений привело к повышению активности уреазы в незагрязненном черноземе на 29-113%. На фоне внесения удобрений негативное действие нефти на активность уреазы в черноземе сохранялось, в некоторых случаях даже усиливалось.

Механизм повышения уреазной активности может быть связан с косвенным влиянием удобрения на численность и активность почвенной микробиоты. Это подтверждается достаточно высокими коэффициентами корреляции активности уреазы и количеством ДНК бактерий и архей в торфяной почве ( $r = 0,85$ ;  $p < 0,01$  и  $r = 0,89$ ;  $p < 0,01$ ) и в черноземе ( $r = 0,79$ ;  $p < 0,01$  и  $r = 0,78$ ;  $p < 0,01$ ).

**Активность фосфатазы** снижается в НЗ почвах с увеличением дозы загрязнения (Новоселова, 2008; Новоселова, Тухватуллина, 2009; Новоселова, Киреева, 2014; Alrumman et al., 2015). Данные, полученные в нашем исследовании, согласуются с выводами, сделанными авторами. Активность фермента в торфяной почве оказалась на 30% ниже на фоне загрязнения в тех вариантах, где не вносились удобрения. В черноземе ингибирование фермента было чуть менее выраженным - активность фосфатазы снизилась на 24-40%.

Внесение удобрений повысило активность фосфатазы в торфяной почве на 3-20%. Максимальные значения фосфатазной активности были получены с совместным внесением аммиачной и нитратной формы азота (вариант «НаммНнитрРК»). На черноземе на фоне применения удобрений фосфатазная активность увеличилась в 1,2-1,3 раза в незагрязненной почве, а в загрязненной - в 1,1-1,5 раза. Максимальная активность фосфатазы в черноземе наблюдается в варианте «НаммРК».

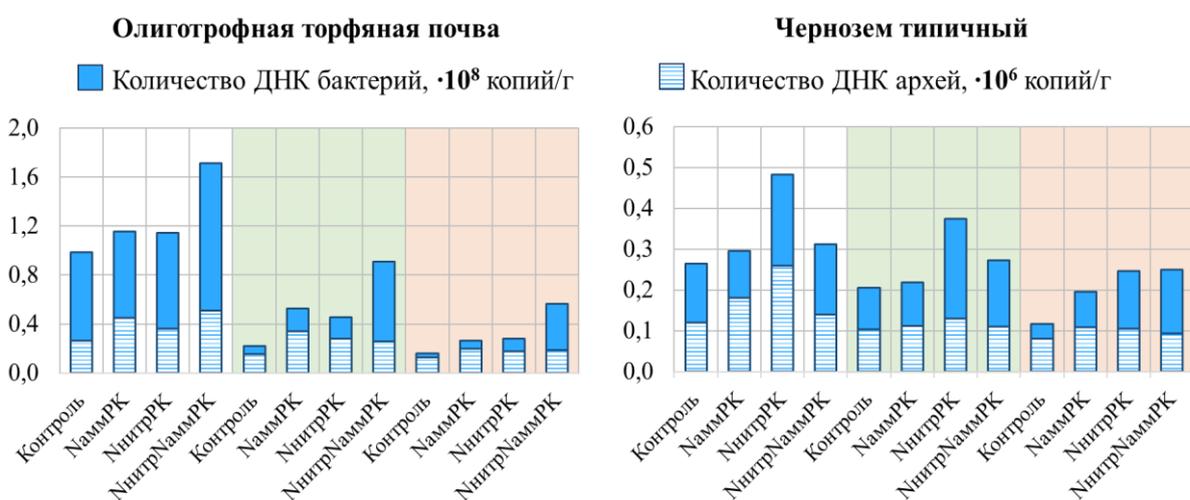
В нашем исследовании не было обнаружено тесной корреляционной зависимости между содержанием подвижного фосфора и активностью фосфатазы в торфяной почве ( $r = 0,51$ ,  $p < 0,01$ ). Вероятнее всего, динамика содержания подвижных фосфатов в

большей степени была связана с влиянием удобрений. Для чернозема отмечается более тесная взаимосвязь ( $r = 0,74$ ,  $p < 0,01$ ), что может свидетельствовать о вкладе в содержание подвижного фосфора как удобрений, так и активности почвенных ферментов.

### 3.4 Влияние минеральных удобрений на биологические свойства при нефтезагрязнении

Прокариоты являются основными участниками процесса разложения НП. Измерение численности прокариотных организмов можно использовать для оценки степени загрязнения почвы, а также для диагностики наличия процессов восстановления и самоочищения (Ананьева, 2003; Марченко, 2008; Марченко и др., 2008; Плешакова, 2010; Khan et al., 2018b).

Исследование влияния минеральных удобрений на биологические свойства почв производилось с помощью измерения количества ДНК прокариот (бактерии и археи) в почве. НЗ часто приводит к общему снижению численности микроорганизмов в почвах, наряду с изменением его структуры (Усачева, 2012; Khan et al., 2018b; Манучарова, 2020, 2021). Снижение численности прокариот отмечено и в нашем исследовании на всех изучаемых типах почв (рис. 10).



**Рисунок 10.** Количество ДНК бактерий и архей в почве (среднее); цветными зонами на графике обозначены варианты, загрязненные нефтью: зеленая зона – 5 г и 100 г нефти/кг почвы; оранжевая зона – 7 г и 150 г нефти/кг почвы

Численность бактерий снизилась в неудообренной *олиготрофной торфяной почве* в 4,5-6 раз по сравнению с незагрязненным контролем, а количество архей уменьшилось в среднем в 2 раза. Угнетение бактериальной биомассы на *черноземе типичном* под влиянием НЗ было выражено слабее: численность бактерий, выраженная в количестве копий генов в почве, значительно снизилась в 1,1-2,3 раза, а численность архей - в 1,2-2,5 раза.

В нашем исследовании применение минеральных удобрений приводило к увеличению количества прокариотной ДНК на всех вариантах опыта. Общее количество ДНК бактерий и архей достоверно увеличилось по сравнению с неудообренным контролем. Подобные тенденции наблюдались как на торфяной почве,

так и на черноземе. Максимум численности ДНК прокариот в торфяной почве наблюдался в вариантах с одновременным внесением аммиачной и нитратной форм азота для обеих исследуемых доз загрязнения, а в черноземе в варианте с внесением нитратной формы азота.

Увеличение количества ДНК архей и бактерий, выступающих в качестве основных деструкторов НП связано со снижением количества НП в почве (Varjani, 2017; Varjani, Urasani, 2017, Манучарова и др., 2020, 2021). Об этом свидетельствуют высокие значения коэффициентов корреляции между данными параметрами (табл. 9).

**Таблица 9.** Коэффициенты корреляции между остаточным содержанием нефти и количеством ДНК прокариот в почве

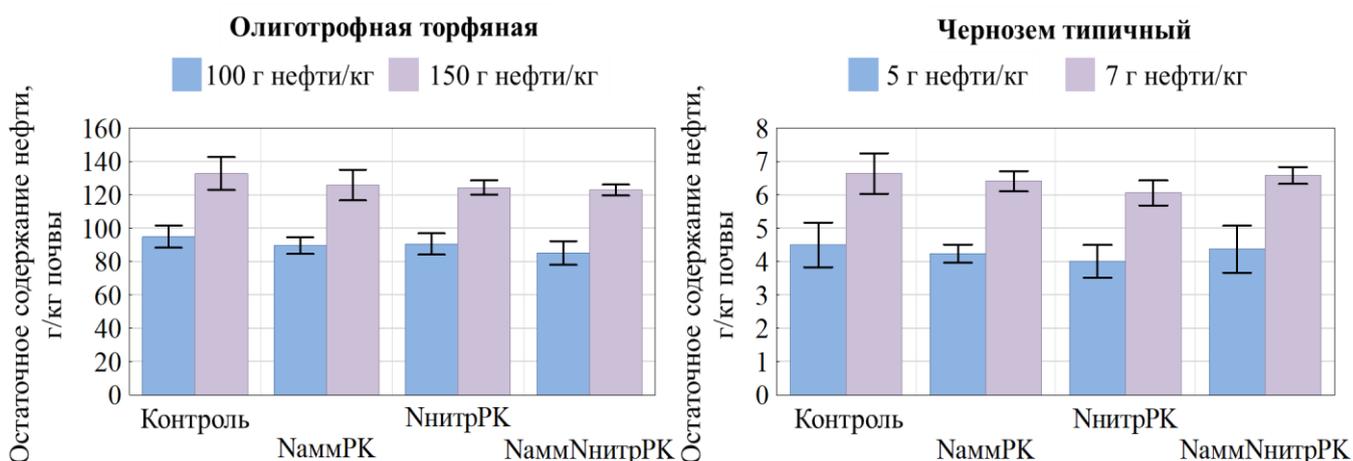
Почва	Олиготрофная торфяная		Чернозем типичный	
	Количество ДНК прокариот в почве, • 10 <sup>6</sup> копий/г			
	Бактерии	Археи	Бактерии	Археи
Остаточное содержание нефти в почве, г/кг	-0,88*	-0,81*	-0,63*	-0,72*

\* коэффициенты корреляции значимы на уровне  $p > 0,01$

Численность прокариот в почвах также связана с продуктивностью растений, что отмечается рядом авторов (Agnello et al., 2016). Высокие коэффициенты корреляции ( $p < 0,01$ ) количества ДНК бактерий ( $r = 0,89$  и  $0,82$ ) и архей ( $r = 0,88$  и  $0,86$ ) с биомассой растений в торфяной почве и черноземе соответственно, могут свидетельствовать о наличии ризосферного эффекта, играющего большую роль в усилении процессов деградации нефти в почве (Муратова, 2013; Singh, Jain, 2003; Nie et al, 2009).

### 3.5 Влияние минеральных удобрений на эффективность деструкции нефти в почве

Содержание НП в почвах к концу вегетационного периода значительно снизилось на 3-16% в торфяной почве и на 8-18% в черноземе типичном (рис. 11).



**Рисунок 11.** Остаточное содержание НП в почве, г/кг (среднее  $\pm$  95% доверит. интервал)

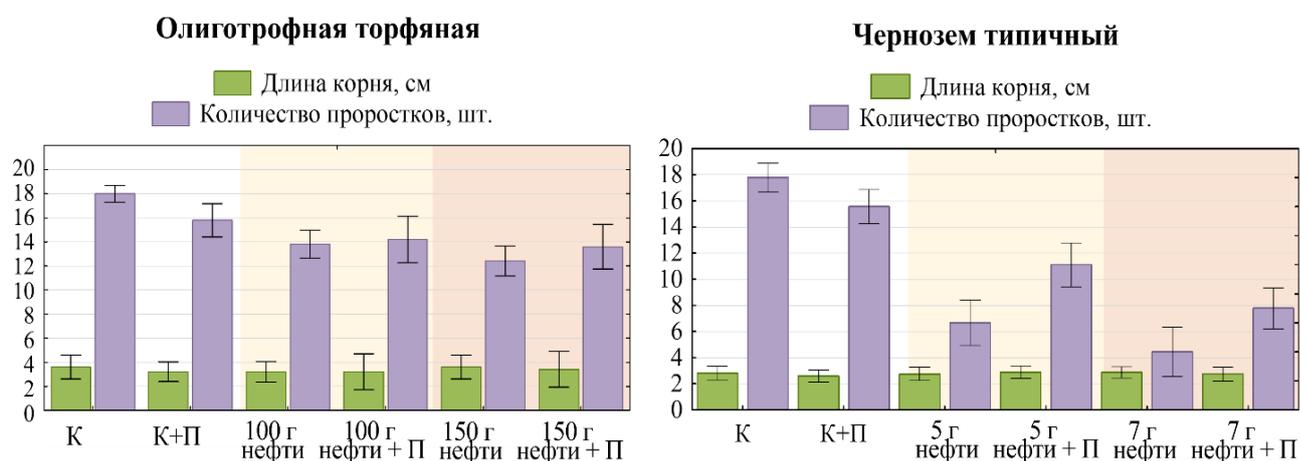
Более интенсивная деструкция нефти в *олиготрофной торфяной почве* наблюдалась в почве с изначально более высокой дозой загрязнителя (150 г нефти/кг).

Содержание нефтепродуктов в этих вариантах снизилось на 9-16%, в то время как на варианте с дозой загрязнения 100 г/кг - на 3-13%. В **черноземе типичном** наоборот, в почвах, изначально загрязненных дозой нефти 5 г/кг почвы, количество НП к окончанию опыта снизилось значительно, чем в почвах, изначально содержащих большее количество поллютанта.

При оптимизации агрохимических свойств почвы показано усиление процессов деградации углеводородов нефти в почвах. Максимальная эффективность деструкции нефти в черноземе типичном наблюдалась при внесении нитратной формы азотных удобрений. В олиготрофной торфяной почве тенденция к максимальному снижению НП наблюдалась в варианте НаммНнитрРК.

### 3.6. Оценка супрессивности нефтезагрязненной почвы

Из двух используемых оценочных показателей фитотестирования наиболее чувствительным оказался показатель всхожести семян. Измерение длины главного корня не дало возможности выявить наличие или отсутствие изменений в модельной тест-системе *Fusarium solani* - *Triticum aestivum* L. как для торфяной почвы, так и для чернозема (рис. 12).



**Рисунок 12.** Количество проростков и длина главного корня семян тест-культуры (среднее  $\pm$  95% доверительный интервал); цветными зонами на графике обозначены варианты, загрязненные нефтью: зеленая зона – 5 и 100 г нефти/кг почвы; оранжевая зона – 7 и 150 г нефти/кг почвы

Всхожесть семян значительно снижалась при присутствии поллютанта в почве, что согласуется с аналогичными исследованиями (Трофимов и др., 2008; Арзамазова и др., 2016). Под воздействием нефти количество проростков сокращалось на 23,3-31,1% на **олиготрофной торфяной почве** и на 18,9-28,9% на **черноземе типичном**. Снижение дозы НЗ приводило к увеличению количества проросших семян на 8-10%, что может свидетельствовать о восстановлении системы по мере уменьшения количества поллютанта.

Тест-культура на торфяной почве показала более высокую чувствительность по сравнению с черноземом. При максимальных дозах загрязнения отклик показателя,

характеризующего всхожесть семян, на исследуемых почвах практически не различался.

Изменение всхожести семян тест-культуры в присутствии патогена показано на обеих исследуемых незагрязненных почвах с аналогичной динамикой изменений.

Обнаружено наличие разнонаправленного действия патогена на семена растений, в зависимости от наличия НЗ. Так, на незагрязненной почве, *Fusarium solani* проявляет негативный ингибирующий эффект, выражающийся в снижении количества проросших семян на 11-12%. На фоне НЗ проявляется тенденция к увеличению всхожести семян в присутствии патогена. В литературных источниках не отмечается эффекта подавления развития фитопатогенных микромицетов, в число которых относится *Fusarium solani*, в присутствии НЗ (Бакаева, 2004; Мифтахова, 2006). Вероятнее всего, токсическое действие исследуемых доз загрязнения на НЗ почвах перекрывает эффект супрессивности, вследствие чего не подтверждается эффект явного влияния патогена на фоне воздействия поллютанта.

В обеих почвах НЗ оказывало в 2-3 раза более значительный эффект на показатель прорастания семян, чем влияние патогена. Это показывает, что воздействие нефти в системе почва-растения-патоген не ограничивается воздействием на почвенную биоту и взаимоотношение патоген-растение, а оказывается более комплексным. Успешное использование супрессивности в качестве интегрального показателя, косвенно характеризующего биологическое состояние почвы при воздействии неблагоприятного фактора, возможно в том случае, если воздействие поллютанта и патогена имеет аналогичный по силе эффект на изучаемую систему.

### **3.7 Анализ главных компонент**

По результатам проведенного анализа было выделено три главных компоненты для каждой исследуемой почвы. Выделенные три группы показателей описывают 85% и 87,4% вариабельности данных, полученных при исследовании олиготрофной торфяной почвы и чернозема типичного соответственно.

Для каждого типа почв было выделено одинаковое число главных компонент. Анализ состава ГК 1 показал, что почвы обоих типов содержали набор показателей характеризующих ферментативную активность почв, численность прокариот в почве и продуктивность трав-ремедиантов (табл. 11).

Они в большей степени характеризуют «биологический» компонент исследуемой системы. При этом, ГК 1 торфяной почвы содержала показатель активности фосфатазы в почве, а для чернозема данный показатель входил в ГК 2, связанную агрохимическими показателями. В черноземе показатель активности фосфатазы сильнее связан с содержанием подвижного фосфора в почве. Помимо этого, в состав ГК 1 в торфяной почве входит показатель содержания НП в почве. Среди всех выделенных индикаторов, входящих в состав ГК 1 торфяной почвы, остаточное содержание НП вносит наибольший вклад среди всех остальных переменных этой группы. В анализе для чернозема данная переменная была отнесена в третью группу, наряду с кислотностью почвы (табл. 11), которые совместно описывают не более 8%

общей вариабельности данных. Это говорит о большей буферности чернозема и о гораздо меньшем влиянии НЗ по сравнению с торфяной.

**Таблица 11.** Распределение показателей по главным компонентам для олиготрофной торфяной почвы и чернозема типичного

	Олиготрофная торфяная	Чернозем типичный
Главная компонента 1	Биомасса растений Содержание НП (НП) Активность каталазы Активность уреазы Активность фосфатазы Количество ДНК бактерий	Биомасса растений Содержание N в биомассе растений Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в биомассе растений Содержание K <sub>2</sub> O в биомассе растений Содержание N-NO <sub>3</sub> в почве Активность каталазы Активность уреазы Количество ДНК бактерий Количество ДНК архей
Главная компонента 2	Содержание N в биомассе растений Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в биомассе растений Содержание K <sub>2</sub> O в биомассе растений Содержание N-NO <sub>3</sub> в почве Содержание K <sub>2</sub> O в почве	Содержание N-NH <sub>4</sub> в почве Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в почве Содержание K <sub>2</sub> O в почве Активность фосфатазы
Главная компонента 3	Содержание N-NH <sub>4</sub> в почве Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в почве	Содержание НП (НП) pH <sub>KCl</sub>

В состав главной компоненты 1 (ГК 1) для чернозема входят также показатели, характеризующие качественный состав растений. В торфяной почве данный набор переменных выделяется в ГК 2, наряду с содержанием нитратов и обменного калия в почве. Стабильность качественного состава растений на органогенной почве больше зависит от агрохимических свойств почвы и условий их произрастания, чем в черноземе.

Показатели, характеризующие агрохимические свойства почв разделяются по разным компонентам при исследовании почв обоих типов. Разделение данных показателей для торфяной почвы на две разные компоненты (ГК 2 и ГК 3), может демонстрировать различия в механизмах трансформации NPK удобрений в почве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние НЗ проявлялось в изменении содержания основных агрохимических элементов, как в олиготрофной торфяной почве, так и в черноземе типичном. Подтверждено значимое снижение содержания минерального азота, подвижного фосфора и обменного калия.

Отмечено значительное негативное воздействие загрязнения на продуктивность трав-ремедиантов в изученных почвах, проявившееся сильнее по мере роста дозы загрязнения. Внесение в почву минеральных удобрений и, как следствие, улучшение условий питания растений закономерно приводило к повышению биомассы растений, что частично снимало эффект загрязнения. Изучение динамики содержания основных макроэлементов в биомассе растений позволило установить негативный эффект НЗ не только на общую продуктивность растений, но и на изменение качественного состава растений.

НЗ оказало негативное влияние на работу ферментов в почве, значительно снижая активность каталазы, уреазы и фосфатазы на обоих изучаемых типах почв.

Из литературных данных известно, что НЗ часто приводит к общему снижению численности микроорганизмов в почвах, наряду с изменением их структуры (Фахрутдинов, 2005; Усачева, 2012; Khan et al., 2018b; Манучарова, 2020, 2021). Снижение численности прокариот отмечено и в нашем исследовании. Применение минеральных удобрений привело к увеличению количества ДНК прокариот на обоих исследуемых типах почв, что свидетельствует о благоприятном воздействии применяемых агрохимических средств на численность и активность почвенных прокариот.

На фоне применения удобрений содержание НП в почве значительно снизилось, наиболее заметно - при применении нитратной формы на черноземе типичном и аммонийно-нитратной - на торфяной олиготрофной почве.

Анализ супрессивности исследуемых почв показал наличие более интенсивного воздействия нефтезагрязнения по сравнению с действием патогена *Fusarium solani*. Влияние НЗ на исследуемую систему, вероятно, оказывается более комплексным и не ограничивается только действием на почвенную биоту.

При применении метода главных компонент выделено несколько групп показателей, вносящих вклад в вариабельность полученных данных. Наибольший вклад вносили показатели, характеризующие биологический компонент: активности ферментов, численность прокариот и продуктивность трав-ремедиантов.

## ВЫВОДЫ

1. Высокий уровень загрязнения нефтью оказал значительное негативное влияние на содержание основных макроэлементов в исследуемых почвах. На олиготрофной торфяной почве содержание минерального азота снизилось на 41-50%, подвижного фосфора – на 24-26%, обменного калия – на 60-62%. На черноземе типичном содержание минерального азота снизилось на 14-22%, подвижного фосфора – на 22-31%, а обменного калия – на 18-26%. Стратегия создания повышенного уровня

обеспеченности питательными элементами в торфяной почве и среднего – в чернозёме позволили достичь или превысить уровень обеспеченности растений макроэлементами, наблюдаемый в незагрязнённой почве.

2. На фоне НЗ отмечалось значительное снижение биомассы растений и содержания в них азота, фосфора и калия. При внесении удобрений произошло увеличение биомассы растений на 80-200% на торфяной олиготрофной почве и на 20-70% на черноземе типичном, одновременно с качественным улучшением макроэлементного состава трав-ремедиантов, что говорит о сбалансированных условиях их произрастания. Максимально благоприятные условия для роста и развития растений формировались на фоне внесения аммонийно-нитратной формы удобрений в олиготрофную торфяную почву и нитратной формы удобрений в черноземе типичный.

3. Активность ферментов под действием НЗ убывала в ряду уреазы > каталазы > фосфатазы в олиготрофной торфяной почве и в ряду каталазы > уреазы > фосфатазы в черноземе типичном. Оптимизация агрохимического фона с помощью минеральных удобрений позволила повысить активность исследуемых ферментов в среднем в 0,7 – 1,4 раза: в олиготрофной торфяной почве в 0,7 – 2,0 раза, в черноземе типичном в 0,9-2,6 раз. Численность прокариот в почвах значительно снизилась на фоне НЗ. При применении минеральных удобрений количество ДНК бактерий и архей повысилось на 20-190% в олиготрофной торфяной почве и на 6-93% в черноземе типичном, достигая максимума при применении аммонийно-нитратной и азотной формы удобрений соответственно.

4. Остаточное содержание НП снизилось к концу вегетационного периода на 3-16% в олиготрофной торфяной почве и на 8-18% в черноземе типичном. Наибольшее снижение содержания НП отмечено при применении аммонийно-нитратной формы удобрений на торфяной олиготрофной почве и при применении нитратной формы на черноземе типичном.

5. НЗ оказало более значительный эффект, понизив всхожесть семян в 2-3 раза, по сравнению с влиянием патогена в модельной тест-системе *Fusarium solani* - *Triticum aestivum* L. Тест-культура на торфяной олиготрофной почве показала более высокую чувствительность по сравнению с черноземом типичным.

6. Среди комплекса показателей, определяющих различия в эффективности деструкции нефти в почве и развитии биомассы растений-ремедиантов, максимальное влияние оказывают показатели, характеризующие биологические свойства почвы. Влияние агрохимических показателей сильнее проявлялось на олиготрофной торфяной почве по сравнению с черноземом типичным, что может демонстрировать различия в механизмах трансформации удобрений в разных почвах.

**Список публикаций в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных WoS, SCOPUS и RSCI, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова:**

1. Арзамазова А.В., Гальцова А.Д., Кинжаев Р.Р., Григорьева И.И. Эффективность применения различных форм азотных удобрений при выращивании злаковых трав на нефтезагрязненной олиготрофной торфяной почве // Проблемы агрохимии и экологии. — 2023. — № 2. — С. 41-47. DOI: 10.26178/AE.2023.51.52.007 (ИФ РИНЦ = 0,414). Вклад автора в печатных листах: 0,48/0,18 (Здесь и далее в скобках приведен объем публикации в печатных листах и вклад автора в печатных листах).
2. Гальцова А.Д., Кинжаев Р.Р., Арзамазова А.В., Романенков В.А. Оценка эффективности различных форм азотных удобрений при выращивании растений-ремедиантов на нефтезагрязненном черноземе типичном // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2024. — Т. 79, № 1. — С. 33-41. DOI: 10.55959/msu0137-0944-17-2024-79-1-33-41 (ИФ РИНЦ = 0,226). (0,56/ 0,39)
3. Кинжаев Р.Р., Гальцова А.Д., Арзамазова А.В., Романенков В.А. Оптимизация азотного питания злаковых трав на нефтезагрязненной олиготрофной торфяной почве // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2024. — Т. 79, № 1. — С. 42-50. DOI: 10.55959/msu0137-0944-17-2024-79-1-42-50 (ИФ РИНЦ = 0,226). (0,56/0,28)
4. Арзамазова А.В., Стройкова М.Н., Кинжаев Р.Р., Гальцова А.Д. Особенности применения удобрений на нефтезагрязненном подзоле иллювиально-железистом при фиторемедиации // Проблемы агрохимии и экологии. — 2024. — № 1. — С. 45-51. DOI: 10.26178/7108.2024.97.23.007 (ИФ РИНЦ = 0,414). (0,44/0,13)