

Методология исследования геосистем Methodology of Geosystems Research

УДК 631.4:502.55:665.6

DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-8

EDN NHBEVN

Токсикологическая оценка загрязнения почв подтоварными водами нефтяных месторождений

Дзюба Е.А., Мельникова С.Д.

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
aea_eco@mail.ru, sveta.melnikova.03.03@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты по токсикологической оценке подтоварных вод (ПНВ) нефтяных месторождений. Исследование проводилось с ПНВ, отобранными на Южном и Северном месторождениях Пермского края. В ходе исследования были использованы три тест-объекта: водоросль *Chlorella vulgaris*, рачки *Daphnia magna* и кресс-салат *Lepidium sativum*. Гидрохимический анализ ПНВ выявил высокие минерализацию, содержание хлоридов, нефтепродуктов, железа, сухого остатка и АПАВ. В статье особое внимание уделяется сравнению токсичности ПНВ Южного и Северного месторождений. Результаты показали, что ПНВ Южного месторождения обладают более выраженным токсическим эффектом, что вероятно, связано с повышенным содержанием АПАВ. Биотестирование на *Chlorella vulgaris* показало ингибирующее действие ПНВ даже при минимальных концентрациях (0,6 %), при этом острая токсичность наблюдалась при концентрациях от 11 % для Южного, и от 16,7 % для Северного месторождений. По реакции *Daphnia magna* так же получено ингибирующее действие ПНВ, особенно для Южного месторождения, где летальный эффект отмечен при концентрации ПНВ 2,5 %. Для Северного месторождения критической оказалась концентрация 8,35 %. Фитотестирование на *Lepidium sativum* выявило значительное снижение всхожести семян и морфометрических показателей растений при загрязнении почвы ПНВ. Получено, что растения, высаженные в предварительно загрязнённую почву, демонстрируют большую устойчивость по сравнению с теми, которые подвергались загрязнению после прорастания. Это указывает на возможность адаптации растений к хроническому загрязнению, но также подчёркивает высокую уязвимость растений к резким выбросам ПНВ. Отмечено, что равномерное распределение загрязнителя в почве может снижать его негативное воздействие, тогда как резкое загрязнение приводит к более выраженным токсическим эффектам. Это имеет важное практическое значение для разработки мер по рекультивации загрязнённых территорий. В заключении статьи подчёркивается необходимость дальнейших исследований для классификации ПНВ по их физико-химическим свойствам и токсикологическим эффектам. Рекомендуется включить мониторинг АПАВ в программы экологического контроля нефтедобывающих предприятий, так как эти вещества могут играть значимую роль в усилении токсичности ПНВ.

Ключевые слова: подтоварные нефтепромысловые воды, токсичность, биотестирование, фитотестирование, нефтяное месторождение

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Пермского края № 24- 17-20025, <https://rscf.ru/project/24-17-20025>

Для цитирования: Дзюба Е.А., Мельникова С.Д. 2025. Токсикологическая оценка загрязнения почв подтоварными водами нефтяных месторождений. Региональные геосистемы, 49(4): 753–767. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-8 EDN: NHBEVN

Toxicological Assessment of Soil Contamination by Oilfield Produced Water

Ekaterina A. Dziuba, Svetlana D. Melnikova

Perm State University,
15 Bukirev St., Perm 614068, Russia
aea_eco@mail.ru, sveta.melnikova.03.03@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of a toxicological assessment of sub-surface waters from oil fields. The research was conducted using produced water samples collected from the Southern and Northern fields in the Perm Territory. Three test objects were used in the study: the algae *Chlorella vulgaris*, the crustacean *Daphnia magna*, and the watercress *Lepidium sativum*. Hydrochemical analysis of the oilfield produced water (OFPW) revealed a high mineralization degree, presence of chloride, petroleum products, iron, dry residue, and anionic surfactants. The article particularly focuses on comparing the toxicity of OFPW from the Southern and Northern fields. The study reveals a more pronounced toxic effect of the produced water from the Southern field, which is probably due to the increased content of anionic surfactants. Biotesting on *Chlorella vulgaris* showed an inhibitory effect of OFPW even at minimal concentrations (0.6 %), with acute toxicity observed at concentrations of 11 % for the Southern field and 16.7 % for the Northern field. The reaction of *Daphnia magna* also revealed an inhibitory effect of OFPW, especially for the Southern field, where a lethal effect was observed at a OFPW concentration of 2.5 %. For the Northern field, a concentration of 8.35 % proved to be critical. Phytotesting on *Lepidium sativum* revealed a significant decrease in seed germination and plant morphometric parameters when the soil was contaminated with OFPW. The plants that had been sown into pre-contaminated soil showed greater resistance than those exposed to contamination after germination. This indicates the possibility of plant adaptation to chronic contamination, but also highlights the high vulnerability of plants to sudden OFPW emissions. The study shows that uniform distribution of a pollutant in the soil can reduce its negative impact, while sudden contamination leads to more pronounced toxic effects. This has important practical significance for the development of measures for the reclamation of contaminated areas. The article concludes by emphasising the need for further research to classify OFPWs according to their physical and chemical properties and toxicological effects. It is recommended that anionic surfactants be included in the environmental monitoring programmes of oil production enterprises, as these substances can play a significant role in enhancing the toxicity of OFPW.

Keywords: produced water, toxicity, biotesting, phytotesting, oil field

Acknowledgements: The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Perm Territory No. 24- 17-20025, <https://rscf.ru/project/24-17-20025>

For citation: Dziuba E.A., Melnikova S.D. 2025. Toxicological Assessment of Soil Contamination by Oilfield Produced Water. Regional Geosystems, 49(4): 753–767 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-4-0-8 EDN: NHBEVH

Введение

Нефть является одним из важнейших топливных ресурсов России и входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья [Государственный доклад..., 2022]. Нефтедобыча активно ведётся на обширной территории и оказывает негативное воздействие на окружающую среду путём загрязнения углеводородами и побочными продуктами технологического процесса. Подтоварная нефтепромысловая вода (ПНВ) – один из таких вторичных продуктов, она относится к категории производственных сточных вод и образуется в результате отстаивания извлечённой на поверхность обводнённой нефти [Мещурова, Ходяшев, 2018; ГОСТ Р 58623-2019, 2019].

ПНВ понимается как «слой, состоящий из подземных вод, поступающих в выработку-ёмкость, и воды, выделившейся из хранимого продукта, который образовывается

в шахтных резервуарах в породах с положительной температурой» [Мещурова, Ходяшев, 2018]. Главным отличием ПНВ от пластовой, например, является причина её появления во внешней среде. ПНВ образуются на этапе подготовки товарной нефти.

Попадание высокоминерализованной жидкости, насыщенной токсичными и взрывоопасными веществами, а также нефтью в атмо-, гидро- и педосферу может привести к трансформации экосистем. Для регионов с развитой нефтедобычей остается актуальной проблема засоления почв, вследствие загрязнения ПНВ. В результате выделяются реакции растений на воздействия: снижается рост, общая биологическая продуктивность, фотосинтетическая активность, интенсивность дыхания и транспирации. Загрязнение атмосферного воздуха происходит в большей мере от резервуаро-отстойников (испаряются углеводороды и сероводород) [Мещурова, Ходяшев, 2018]. В научной литературе достаточно много исследований, посвящённых влиянию нефтяного загрязнения на компоненты окружающей среды, но практически отсутствуют данные о влиянии ПНВ. При этом загрязнения ПНВ на объектах нефтедобычи случаются чаще.

Существуют разные методы мониторинга качества окружающей среды, однако биотестирование отличается тем, что может в короткие сроки показать, как совокупное токсическое действие влияет на самые чувствительные живые компоненты биогеоценозов. Биотестирование основано на оценке изменения параметров организмов, популяций и сообществ таких, как скорость роста, уровень биомассы, ферментативная активность, которые культивируются в лабораторных условиях и интродуцируются в исследуемый образец [Дзюба, 2014; Даянов, Юмагулова, 2017; Валиуллина, 2020].

В исследовании с целью установления токсичности подтоварных нефтепромысловых вод в качестве тест объектов Н.В. Маячкина с соавторами [2024] используют дафний (*Daphnia magna* Straus), зелёную одноклеточную водоросль (*Chlorella vulgaris* Beijer) и мальков рыб. Результаты показали, что сильноминерализованные воды являются остро токсичными для всех исследуемых организмов. Стоит учитывать, что в биотестах с использованием хлореллы можно наблюдать активный прирост культуры, что не всегда обусловлено вредным воздействием загрязняющих веществ. Однако это может говорить о том, что в системе нарушен экологический баланс [Дзюба, 2014; Даянов, Юмагулова, 2017].

А.В. Хаматова [2023] в исследовании вод р. Каменки наблюдала стимулирующее воздействие на рост водоросли. С.А. Бузмаков с соавторами [2021] (по увеличению биомассы хлореллы более чем на 30 %) делали вывод о токсическом действии водных вытяжек из нефтезагрязнённых почв, несмотря на стимулирующий эффект. Л.С. Кучин и Е.А. Немчанинова [2023] судили о росте степени токсичности вод р. Ива и её притоков по снижению оптической плотности водоросли. В биотестах по исследованию степени негативного воздействия нефтезагрязнённых сред помимо хлореллы использовались рачки дафнии (*Daphnia magna* Straus). Учёными установлена низкая чувствительность теста на их выживаемость [Бузмаков и др., 2021; Buzmakov et al., 2021; Хаматова, 2023].

В.В. Александрова и В.И. Цыганова в своей работе [2021] определили токсичность почв, загрязнённых ПНВ в разное время, с помощью рачков цериодафнии (*Ceriodaphnia Affinis*) и пришли к выводу, что степень токсичности почвы имеет определённую зависимость от давности разлива и достигает максимальных значений на участках с наиболее давним сроком загрязнения.

Исследование К.А. Романовой [2021] показывает, что ПНВ негативно сказывается на функциональных особенностях растительных тест-объектов: свеклы (*Beta vulgaris* L.), гороха (*Pisum sativum* L.) и овса (*Avena sativa* L.). Выявлена прямая зависимость снижения большинства изученных параметров растений от увеличения концентрации ПНВ в почве, которая свидетельствует о токсичности среды.

В качестве растительных тест-объектов в фитотестах использовались пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.), кресс-салат (*Lepidium sativum* L.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), загрязнение нефтью разных

типов почв оказало негативное влияние на длину корней во всех исследуемых образцах [Бузмаков и др., 2021; Vuzmakov et al., 2021]. Сельскохозяйственные культуры кресс-салат и пшеница выделяются как более устойчивые к низкому уровню загрязнения по сравнению с таёжным деревом сибирской ели.

Целью данного эксперимента стало установление токсичности ПНВ методами биотестирования.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются ПНВ и почвы, отобранные в границах Южного и Северного нефтяных месторождений Пермского края (рис. 1). Был проведен гидрохимический анализ. Токсичность определяли методом биотестирования с использованием тест-объектов *Chlorella vulgaris* Beijer, *Daphnia magna* Straus, *Lepidium sativum* L.

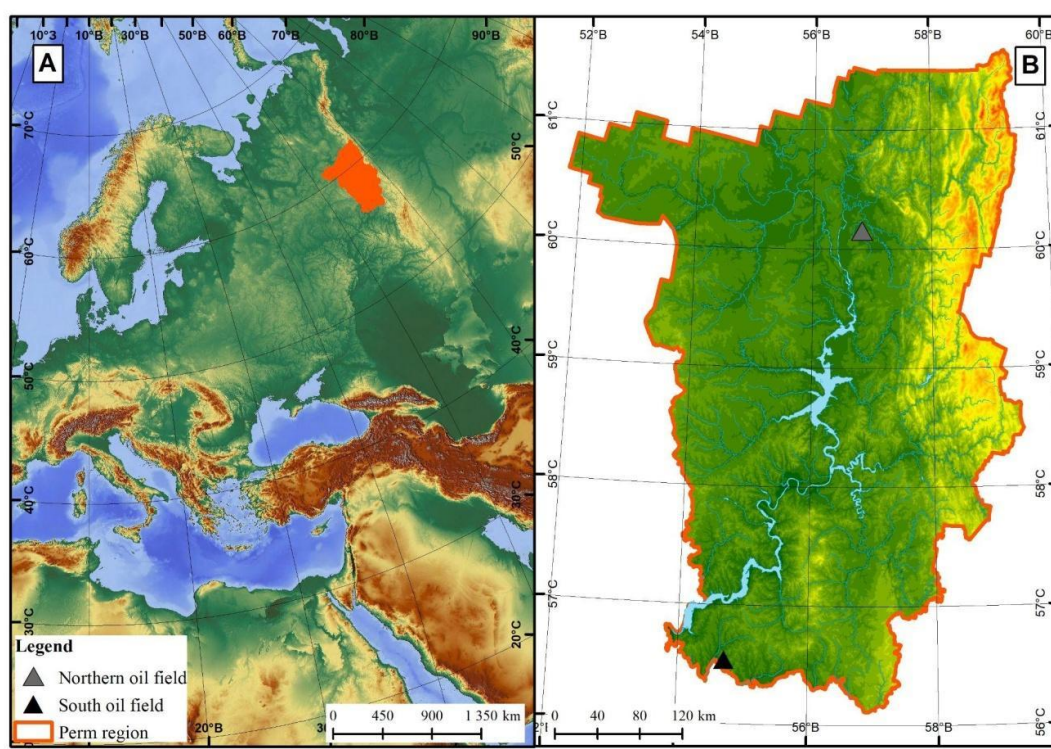


Рис. 1. Исследуемые месторождения на карте Пермского края
Fig. 1. Investigated deposits on the map of the Perm Territory

Биотестирование на тест-объектах *Chlorella vulgaris* и *Daphnia magna* проводилось согласно аттестованным методикам [ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04, 2014; ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-06; 2014]. По результатам исследований на тест-объекте *Chlorella vulgaris* принималось, что критерием токсичности пробы является снижение на 20 % и более (подавление роста) или стимулирование на 30 % и более. Острое токсическое действие – угнетение на 50 % и более. По результатам исследований делался вывод, что ПНВ не оказывает токсического действия, при числе погибших в тестируемой пробе дафний менее 10 %, при гибели от 10 до 50 % – фиксировали токсическое действие, которое не было отнесено к острому, при смертности выше 50 % считали, что наблюдается острое токсическое действие. [ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04, 2014; ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-06, 2014]. Биотестирование на тест-объекте *Lepidium sativum* проводили согласно аттестованной методике [ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-06, 2014; Сергеев, Давыденко, 2016]. В основу лег хронический вегетационный эксперимент [ГОСТ Р ИСО 22030-2009, 2009]. Степень влияния ПНВ определяли по всхожести семян, массе проростков,

а также надземной и подземной части растения, длине побега и корня. Схема разбавлений и внесения ПНВ по концентрациям выглядела следующим образом:

- для *Chlorella vulgaris* и *Daphnia magna* (%): 0,6, 1,2, 1,9, 3,7, 5,6, 11, 16,7, 33, 50, 100 (дополнительные концентрации для Южного месторождения: 2,35, 2,5, 2,8, 3,25 %; для Северного месторождения – 7, 8,35, 9,7 %);
- для *Lepidium sativum* (%): 1, 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 20, 25, 30.

В зависимости от результатов опыта субстратам присваивают один из четырёх уровней загрязнения [Кучин, Немчанинова, 2023]: загрязнение отсутствует (при всхожести семян 90–100 %); слабое загрязнение (при всхожести 60–90 %); среднее загрязнение (при всхожести 20–60 %); сильное загрязнение (при всхожести семян < 20 %).

По полученным результатам были построены графики, рассчитаны уравнения регрессии и коэффициенты достоверности аппроксимации.

Анализ ПНВ проводился в аккредитованной лаборатории гидрохимического анализа геологического факультета ПГНИУ, определялись следующие показатели: водородный, аммоний-ион, хлорид-ион, сульфат-ион, нитрит-ион, нитрат-ион, массовая концентрация фосфат-ионов, АПАВ, массовая концентрация нефтепродуктов, массовая концентрация общего железа, массовая концентрация сухого остатка. Определение проводилось для не разбавленных проб. Определяемые параметры выбраны исходя из возможного токсического воздействия на растения и гидробионты. Нефтепродукты и АПАВ наиболее часто определяются при загрязнении почв ПНВ; аммоний-ион, нитрит-ион, нитрат-ион – при повышенных концентрациях вызывают эвтрофикацию, нарушают метаболизм растений и гидробионтов; хлорид-ион и сульфат-ион – являются индикаторами минерализации и коррозионной активности вод, являются частыми загрязнителями при нефтедобыче; общее железо является маркером коррозии трубопроводов и оборудования; сухой остаток показывает общую минерализацию, что позволяет оценить общее засоление почв в результате загрязнения; фосфаты свидетельствуют о применении реагентов в системе поддержания пластового давления. Данный перечень позволяет выявить причины загрязнения, оценить вклад отдельных загрязнителей в общий результат токсичности.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты по определению физико-химических свойств подтоварных вод (в пробах без разбавления).

Таблица 1
Table 1

Физико-химические свойства подтоварных вод
Physico-chemical properties of produced water

Наименование показателя	Северное месторождение	Южное месторождение
Водородный показатель, ед. pH	6,61	6,68
Аммоний, мг/дм ³	< 0,5	< 0,5
Хлорид-ион, мг/дм ³	> 20 000	> 20 000
Сульфат-ион, мг/дм ³	457	451
Нитрит-ион, мг/дм ³	< 0,20	< 0,20
Нитрат-ион, мг/дм ³	< 0,20	< 0,20
Массовая концентрация фосфат-ионов, мг/дм ³	< 0,05	< 0,05
АПАВ, мг/дм ³	0,153	0,300
Массовая концентрация нефтепродуктов, мг/дм ³	4,18	1,56
Массовая концентрация общего железа, мг/дм ³	7,66	5,27
Массовая концентрация сухого остатка, мг/дм ³	> 35 000	> 35 000

ПНВ с Северного и Южного нефтяных месторождений имеют сходный состав, характеризуются нейтральной реакцией среды, высоким содержанием хлоридов и железа. ПНВ Северного месторождения отличаются большей концентрацией железа и нефтепродуктов и меньшим содержанием анионных поверхностных активных веществ (АПАВ) по сравнению с водами Южного месторождения. Преобладание анионов хлора характерно для химического состава ПНВ, однако по усредненным данным, полученными С.А. Алиевым и В.Н. Тюриным [2020] его значение примерно в 2 раза меньше (9400 мг/дм^3), чем в исследуемых пробах. Среднее значение содержания хлоридов в поверхностных и болотных водах в 200 раз меньше.

Массовая концентрация нефтепродуктов в ПНВ Северного месторождения превышена почти в 84 раза, в ПНВ Южного – в 11 раз. Содержание АПАВ превосходит нормативное значение в Северной ПНВ в 1,5 раза, а в Южной ПНВ оно равно 3 ПДК. Концентрация хлоридов в изучаемых ПНВ более, чем в 57 раз больше ПДК для химических веществ в воде. Накопление железа в ПНВ Северной залежи в 26 раз выше значения ПДК, а в водах Южной – в 18. Массовая аккумуляция сухого остатка в 23 раза больше значения ПДК. Значения водородного показателя, аммония, сульфатов, нитритов и нитратов находятся в пределах утвержденных нормативов [ПНД Ф Т 14.1:2.4.19-2013, 2013; СанПиН 1.2.3685-21, 2021].

ПНВ с таким химическим составом, насыщенная хлоридами и железом, будет негативно сказываться на состоянии экосистем. Помимо возрастающей общей минерализации, происходит изменение ионного состава в сторону доминирования ионов хлора, хотя в болотных водах, например, характерно преобладание гидрокарбонатов и ионов щелочноземельных металлов (магния и кальция) [Алиева, Тюрин, 2020].

Результаты биотестирования на тест-объекте *Chlorella vulgaris* представлены в табл. 2. Можно отметить, что все результаты более чем на 20 % меньше относительно контрольной пробы, ПНВ в концентрациях от 0,6 % до 100 % оказывают угнетающее действие на тест-объект.

Таблица 2
Table 2

Результаты биотестирования на тест-объекте *Chlorella vulgaris*
Results of biotesting on the *Chlorella vulgaris* test object

Концентрация ПНВ в пробе, %	Северное месторождение		Южное месторождение	
	Оптическая плотность	% отклонения от контроля	Оптическая плотность	% отклонения от контроля
Контроль (дист. вода)	0,137	0	0,137	0
100	0,021	84,67	0,017	87,59
50	0,024	82,48	0,014	89,78
33	0,013	90,51	0,028	79,56
16,7	0,069	49,64	0,026	81,02
11	0,081	40,88	0,025	81,75
5,6	0,076	44,53	0,093	32,12
3,7	0,08	41,61	0,084	38,69
1,9	0,065	52,55	0,107	21,90
1,2	0,175	27,74	0,096	29,93
0,6	0,097	29,20	0,071	48,18

Острой токсичностью характеризуются пробы с содержанием подтоварных вод от 16,7 до 100 % для Северного месторождения. Значения от 0,6 до 11 % определяются как токсичные. ПНВ Южного месторождения остро токсичны при процентном содержании от 11 до 100 %, от 0,6 до 5,6 % – ПНВ токсичны. ПНВ Южного месторождения оказывают

более существенное токсическое воздействие, возможно из-за большего содержания АПАВ (в 2 раза выше, чем Северных ПНВ).

Результаты биотестирования на тест-объекте *Daphnia magna* представлены в табл. 3. Рачки *Daphnia magna* Straus начинают погибать при концентрации Северной ПНВ в 7 %. Предельная граница для дафний – 8,35 %. При дальнейшем увеличении содержания ни одна из десяти особей не выживала.

Таблица 3
Table 3

Результаты биотестирования ПНВ на тест-объекте *Daphnia magna*
Results of biotesting of produced water on the *Daphnia magna* test object

Концентрация, %	Северное месторождение				Южное месторождение			
	1 пов.	2 пов.	3 пов.	Сред.	1 пов.	2 пов.	3 пов.	Сред.
Контроль (дист. вода)	10	10	10	10	10	10	10	10
0,6	10	10	10	10	10	10	10	10
1,2	10	10	10	10	10	10	10	10
1,9	10	10	10	10	8	9	9	8,7
2,35	–	–	–	–	9	7	5	7
2,5	–	–	–	–	0	1	0	0,3
2,8	–	–	–	–	0	1	0	0,3
3,25	–	–	–	–	0	0	0	0
3,7	10	10	10	10	0	0	0	0
5,6	10	10	10	10	0	0	0	0
7	10	8	10	9,3	–	–	–	–
8,35	6	6	7	6,3	–	–	–	–
9,7	0	0	0	0	–	–	–	–
11	0	0	0	0	0	0	0	0
16,7	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0

Дафнии начинают погибать в пробах с концентрацией Южной ПНВ 2,35 % и Северной ПНВ 8,35 % (предел), дальнейшее увеличение содержания приводит к летальному исходу. Для Южных ПНВ острой токсичностью характеризуются почвы с процентным содержанием загрязнителя от 1,9 до 100 %, от 0,6 до 1,2 % – пробы характеризуются как безвредные. Для Северных ПНВ остро токсичными считаются проценты от 8,35 до 100 %, при 7 % пробы характеризуются как токсичные, от 0,6 до 5,6 % – безвредные. По результатам биотестирования на тест-объекте *Daphnia magna* также более токсичными оказались ПНВ Южного месторождения.

Результаты биотестирования на тест-объекте *Lepidium sativum* представлены в табл. 4–7. В некоторых пробах семена кресс-салата не взошли. Кресс-салат не вырос на почве, изначально загрязнённой Южной ПНВ в концентрациях 10 % и выше, а также в почве, загрязнённой через неделю 7,5 % этой ПНВ и выше. Тест-объект не выжил и в контейнерах, в которые ПНВ Северного месторождения была внесена через неделю после посадки в количестве 25 %.

Таблица 4
Table 4

Результаты измерений кресс-салата, посаженного в предварительно загрязнённую ПНВ почву
с Северного нефтяного месторождения
Measurement results for cress planted in soil pre-contaminated with produced water from the Northern oilfield

Концентрация ПНВ, %	Длина корня, см	Длина стебля, см	Масса корня, г	Масса стебля, г
0	4,31	5,51	0,00645	0,0242
1	4,42	4,76	0,001	0,0276
2,50	4,01	6,47	0,0017	0,039
5	4,8	6,47	0,0038	0,0304
7,50	4,78	6,63	0,0042	0,0303
10	4,48	3,27	0,0009	0,0339
12,50	4,24	3,96	0,0021	0,0309
15	7,51	3,01	0,0013	0,023
20	5,03	2,21	0,0031	0,0155
25	3,12	1,68	0,0044	0,0167
30	2,22	1,5	0,0063	0,0158
Уравнение регрессии	$y = -4,1796x + 4,9355$	$y = -17,07x + 6,1277$	$y = 0,006x + 0,0025$	$y = -0,0584x + 0,0329$
R	0,1025	0,7593	0,0893	0,5564

Таблица 5
Table 5

Результаты измерений кресс-салата, посаженного в предварительно загрязнённую ПНВ почву
с Южного нефтяного месторождения
Measurement results for cress planted in soil pre-contaminated with produced water from the Southern oilfield

Концентрация ПНВ, %	Длина корня, см	Длина стебля, см	Масса корня, г	Масса стебля, г
0	5,27	5,29	0,00895	0,02271
1	2,68	5,67	0,0167	0,03839
2,50	3,21	4,24	0,0093	0,03716
5	5,39	2,47	0,00475	0,01628
7,50	0,52	1,81	0,037	0,01193
Уравнение регрессии	$y = -35,038x + 4,5352$	$y = -53,997x + 5,6239$	$y = 0,2567x + 0,0071$	$y = -0,2749x + 0,0341$
R	0,2808	0,9381	0,3722	0,487

Таблица 6
Table 6

Результаты измерений кресс-салата, выращенного в почве,
загрязнённой через неделю ПНВ с Северного нефтяного месторождения
Measurement results for cress planted in soil contaminated with produced water
from the Northern oilfield one week after

Концентрация ПНВ, %	Длина корня, см	Длина стебля, см	Масса корня, г	Масса стебля, г
0	4,31	5,51	0,00645	0,0242
1	3,97	4,06	0,0031	0,0324
2,50	2,61	3,27	0,0025	0,0316
5	3,79	3,51	0,0019	0,0389
7,50	3,03	3,07	0,0132	0,0298
10	3,08	3,99	0,0107	0,0195
12,50	1,84	4,09	0,0051	0,0211
15	2,33	3,77	0,0027	0,0178
20	—	—	—	—
25	1,07	3,1	0,0025	0,0141
30	0,85	2,6	0,0001	0,0062
Уравнение регрессии	$y = -10,733x + 3,8525$	$y = -4,9306x + 4,232$	$y = -0,0141x + 0,0063$	$y = -0,0831x + 0,0326$
R	0,8383	0,3823	0,1157	0,7336

Таблица 7
Table 7

Результаты измерений кресс-салата, выращенного в загрязнённой
через неделю почве подтоварными водами с Южного нефтяного месторождения
Measurement results for cress grown in soil contaminated
with produced water from the Southern oilfield one week after

Концентрация ПНВ, %	Длина корня, см	Длина стебля, см	Масса корня, г	Масса стебля, г
0	5,27	5,29	0,00895	0,02271
1	3,5	5,42	0,00162	0,0347
2,50	3,79	4,31	0,00197	0,0233
5	3,99	3,23	0,00712	0,0151
Уравнение регрессии	$y = -15,815x + 4,4736$	$y = -45,366x + 5,5265$	$y = 0,0026x + 0,0049$	$y = -0,2477x + 0,0292$
R	0,1938	0,9407	0,0002	0,4446

Наибольшая длина корня (7,5 см) отмечается в контейнерах с концентрацией в 15 %, при дальнейшем увеличении доли ПНВ в пробах показатели длины снижаются до наименьшей (2,2 см) (см. табл. 4). Длина стебля и масса корня растут с увеличением содержания до 7,5 %. Масса корня падает до минимальной (0,0009 г) при 10 %, после чего возрастает с повышением доли загрязнителя до максимальной (0,0063 г). Стебель набирает массу на промежутке от 1 до 2,5 %, после чего постепенно её теряет с увеличением поллютанта в почве. По рассчитанным уравнениям регрессии и коэффициенту аппроксимации достоверно описан процесс воздействия загрязнения ПНВ на длину стебля ($R = 0,76$), близки к достоверному данные по массе корня.

Максимальная длина корня (5,4 см) наблюдается при предельной концентрации в 7,5 % (см. табл. 5). Длина стебля, масса корня и стебля имеют наибольшие значения (5,7 см, 0,0167 г и 0,0384 г соответственно) при 2,5 %, наименьшие – при 7,5 %. По рассчитанным уравнениям регрессии и коэффициенту аппроксимации достоверно описан процесс воздействия загрязнения ПНВ на длину стебля ($R = 0,94$).

Длина корня уменьшается с увеличением процента ПНВ в пробе от 5 %, а длина стебля от 12,5 % (см. табл. 6). Масса корня уменьшается на промежутке от 1 до 5 %, при 7,5 % она достигает наибольшего значения (0,0132 г), с дальнейшим повышением концентрации она уменьшается до минимального (0,0001 г). Масса стебля имеет такую же тенденцию падения значений, как и масса корня, однако максимальное значение отмечается в пробе с 5 %. По рассчитанным уравнениям регрессии и коэффициенту аппроксимации достоверно описаны процессы воздействия загрязнения ПНВ на длину корня ($R = 0,84$) и массу стебля ($R = 0,73$).

Результаты, отраженные в табл. 7, говорят о росте длины корня и массы стебля с увеличением доли ПНВ в пробах, в то время как масса корня и длина стебля имеют обратную зависимость. По рассчитанным уравнениям регрессии и коэффициенту аппроксимации достоверно описан процесс воздействия загрязнения ПНВ на длину стебля ($R = 0,94$).

По результатам биотестирования ПНВ с помощью тест-объекта *Chlorella vulgaris* Beijer были построены графики (рис. 2, 3).

Можно сделать вывод о том, что существует тенденция снижения оптической плотности водоросли с увеличением содержания ПНВ. Тест-объект негативно реагирует на любые дозы исследуемой ПНВ, вызывая токсическое и острое токсическое воздействие на тест-объект. Биотестирование с использованием дафнии показывает, что ПНВ Южного месторождения оказывают большее токсическое действие, чем воды Северного месторождения: предельная концентрация вод Южного месторождения в 4 раза меньше Северного.

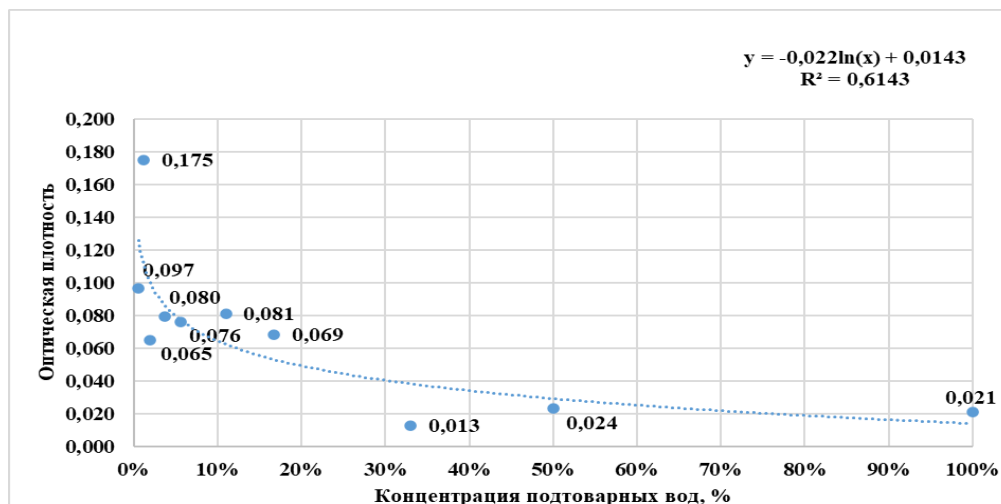


Рис. 2. Оптическая плотность проб с Северного месторождения
Fig. 2. Optical density of samples from the Northern field

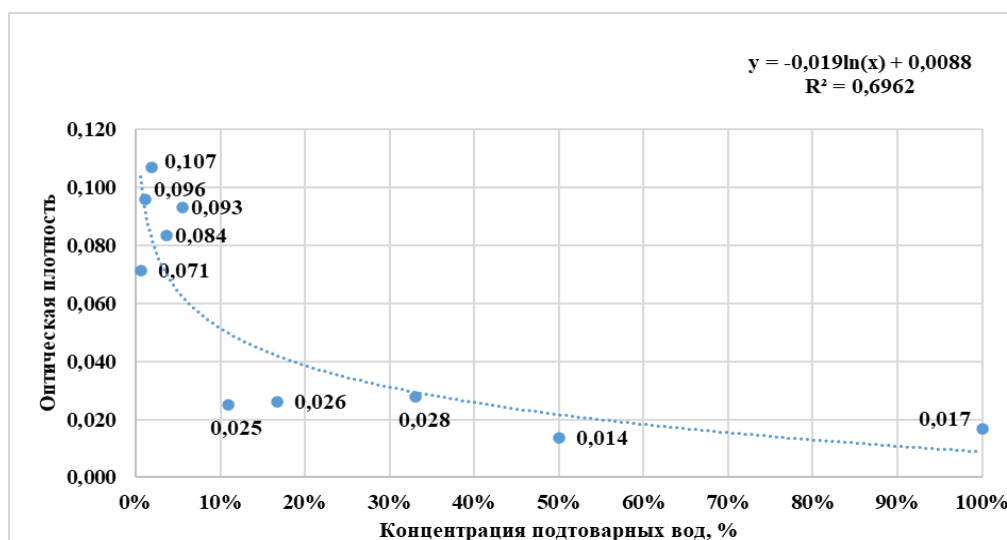


Рис. 3. Оптическая плотность проб с Южного месторождения
Fig. 3. Optical density of samples from the Southern field

Негативное влияние загрязнения ПНВ по результатам фитотестирования с использованием *Lepidium sativum* L. показано на рис. 4–7.

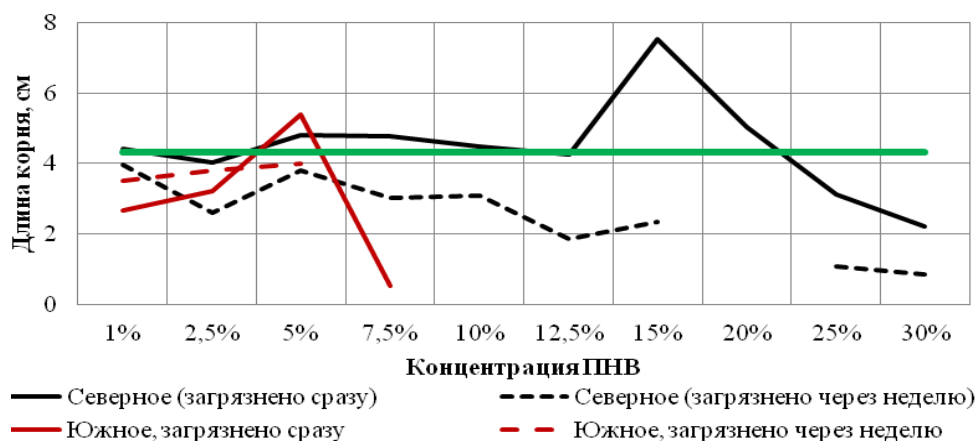


Рис. 4. График зависимости длины корня от концентрации загрязнителя
Fig. 4. Graph of root length dependence on pollutant concentration

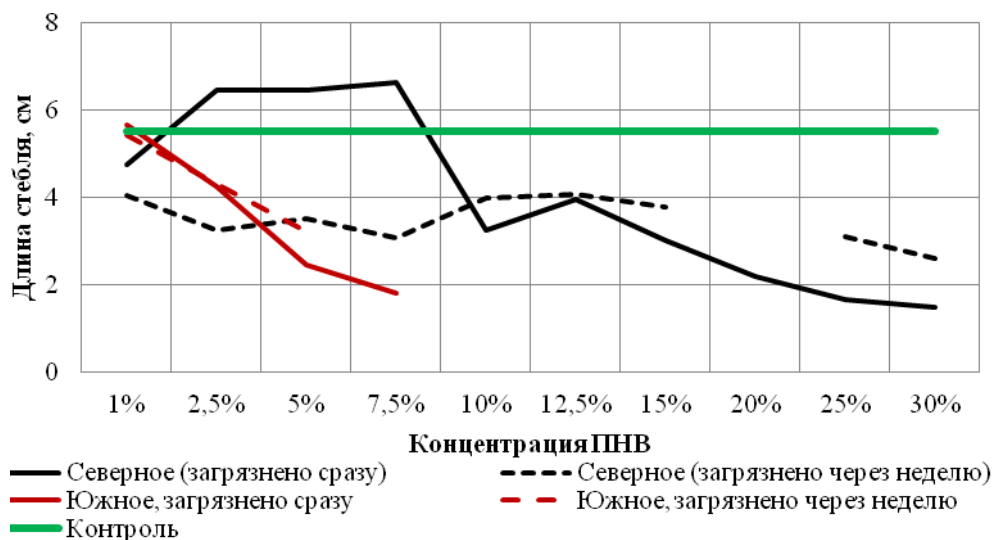


Рис. 5. График зависимости длины стебля от концентрации загрязнителя
Fig. 5. Graph of stem length dependence on pollutant concentration

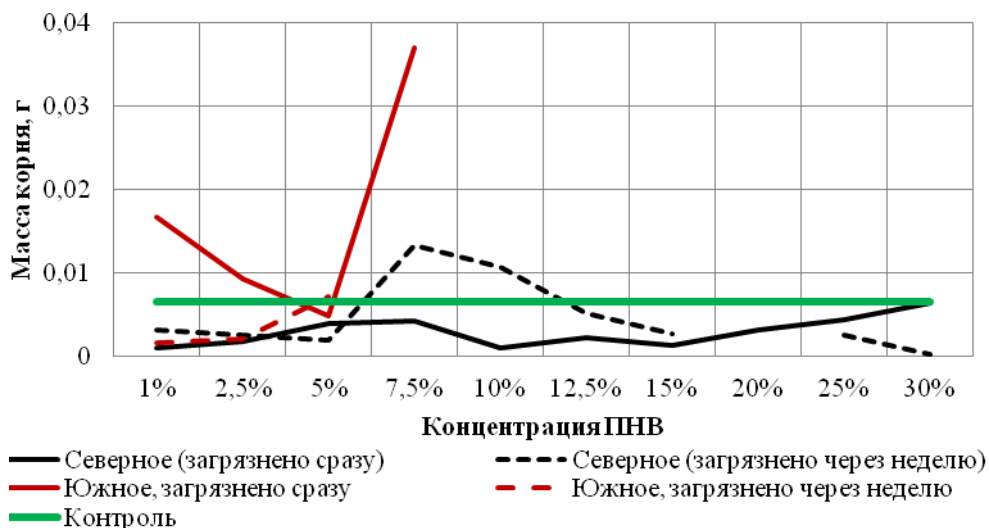


Рис. 6. График зависимости массы корня от концентрации загрязнителя
Fig. 6. Graph of root mass dependence on pollutant concentration

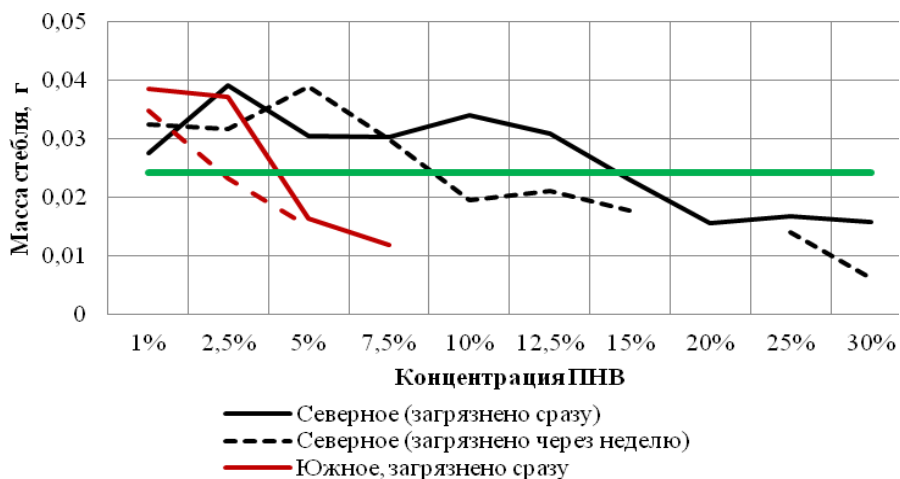


Рис. 7. График зависимости массы стебля от концентрации загрязнителя
Fig. 7. Graph of stem weight dependence on pollutant concentration

В большинстве своём показатели исследуемых проб ниже контрольных, что свидетельствует о негативном влиянии подтоварных вод на ростки. Можно отметить, что растения, высаженные в загрязнённую почву, лучше переносят те же концентрации ПНВ, по сравнению с почвой, в которую ПНВ были внесены через неделю.

Наличие поллютанта способствует росту массы стебля в сравнении с контролем: при концентрации 1 % увеличение показателя наблюдается во всех случаях, при 2,5 % – в пробах, изначально загрязнённых ПНВ с Северного и Южного месторождения, от 5 до 7,5 % – в пробах с ПНВ Северного месторождения, а при 10–12,5 % – в пробах, в которые сразу добавили ПНВ с Северного месторождения.

В пробах, с ПНВ Северного месторождения, наблюдается тенденция уменьшения ростовых показателей, и только масса корня увеличивается в пробах, загрязнённых изначально.

В пробах, в которые сразу внесли ПНВ Южного месторождения, в концентрациях от 1 до 5 % наблюдается увеличение длины корня, в то время как его масса уменьшается совместно с длиной и массой стебля.

Наблюдается рост показателей массы и длины корня параллельно с уменьшением показателей массы и длины стебля в пробах, которые загрязнены через неделю водами с Южного месторождения.

Судя по данным, ПНВ Южного месторождения сильнее оказывает токсическое действие на кресс-салат: ростки погибают при концентрации в 10 % в изначально загрязнённых почвах и при 7,5 % в почвах, в которые ПНВ внесли через неделю.

Стоит отметить, что для растений, растущих в почве, в которую добавляли Южную ПНВ, есть предел, после которого масса и длина стеблей только стремительно убывает. Тогда как для растений, выросших в почвах с добавлением ПНВ с Северного месторождения, существует тенденция периодического увеличения ростовых показателей стебля. Каждой концентрации ПНВ был присвоен уровень загрязнения субстрата, определённый по всхожести семян. Для ПНВ с Северного месторождения установлено, что при 20 % и выше обеспечивается сильное загрязнение почвы. ПНВ с Южного месторождения оказывают такое воздействие уже при 5 %.

Заключение

В ходе проведённых биотестов были сформированы следующие выводы:

1. Все концентрации ПНВ оказывают негативное влияние на жизнедеятельность водорослей (*Chlorella vulgaris*). По результатам воздействия загрязнения ПНВ характеризуется как токсичное и острое токсичное. Острой токсичностью характеризуются пробы с содержанием подтоварных вод от 16,7 до 100 % для Северного месторождения, и от 11 до 100 % для Южного месторождения.

2. Тест-объект *Daphnia magna* показал большую устойчивость к загрязнению ПНВ. Острая токсичность для Южных ПНВ характеризуется для проб с содержанием от 2,5 до 100 %, для Северных ПНВ от 8,35 до 100 %. От 0,6 до 1,2 % для Южных ПНВ и от 0,6 до 5,6 % для Северных ПНВ – пробы характеризуются как безвредные.

3. Анализ всхожести кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) выявил, что сильное загрязнение достигается при концентрации ПНВ Южного месторождения в 5 %, в пробах с ПНВ Северного месторождения такая степень достигается при 20 %.

4. ПНВ Южного нефтяного месторождения токсичнее вод с Северного месторождения, что подтверждают биотесты на всех тест-объектах. Биотесты на *Chlorella vulgaris* оказались чувствительнее к загрязнению ПНВ. Вероятно, такая токсичность Южных ПНВ обусловлена высоким содержанием АПАВ (в два раза больше, чем Северных).

5. Параметр выживаемости кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) выше при его посадке в предварительно загрязнённую почву (возможно на это влияет то, что распределение

ПНВ происходит равномерно по всей пробе, часть веществ могут сорбироваться, переходить в более безвредные формы). Внесение ПНВ в пробы через неделю после высадки приводит к существенному снижению предельных концентраций выживаемости (так как растения получают резкое загрязнение на поверхности, которое не успевает равномерно распространиться). В данном случае это говорит о том, что при попадании ПНВ в экосистемы, растения будут реагировать остро, но если высаживать растения на загрязнённые ранее территории, то они могут прижиться.

6. Содержание АПАВ в ПНВ предположительно оказывает влияние на токсичность. Необходимо в дальнейших экспериментах более детально исследовать эту гипотезу, и при репрезентативных результатах рекомендовать измерение содержания АПАВ в пробах воды и почвы на территориях месторождений в рамках экологического мониторинга наряду с нефтепродуктами и хлоридами.

7. Загрязнение ПНВ оказывает острое токсическое действие на живые организмы, но при этом исследуется значительно реже, чем загрязнение нефтью. В дальнейшем необходимо проводить исследования с ПНВ разных физико-химических свойств, классифицировав их. Применяемые в данном исследовании тест-объекты подходят для дальнейшего изучения токсичности ПНВ. Вероятно, стоит увеличить число тест-объектов из числа высших растений, а также провести измерения их биохимических параметров.

Список источников

- ГОСТ Р 58623-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные. Правила технической эксплуатации. 2019. М., Стандартинформ, 75 с.
- ГОСТ Р ИСО 22030-2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая фитотоксичность в отношении высших растений. 2009. М., Стандартинформ, 16 с.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году. 2022. М., 626 с.
- ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. 2014. М., Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 36 с.
- ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-06. Методика прямого подсчета *Daphnia magna* для определения токсичности питьевых, пресных, природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления методом прямого счета. 2014. М., Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 38 с.
- ПНД Ф Т 14.1:2:4.19-2013. Методика определения токсичности питьевых, грунтовых, поверхностных и сточных вод, растворов химических веществ по измерению показателей всхожести, средней длины и среднего сухого веса проростков семян кресс-салата (*Lepidium sativum*). 2013. М., Стерлитамак, 28 с.
- СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 2021. М., Минюст России, 987 с.

Список литературы

- Александрова В.В., Цыганова В.И. 2021. Оценка токсичности почв загрязнённых подтоварной водой на тест-объекте *Ceriodaphnia Affinis*. Заметки ученого, 8: 460–466.
- Алиева С.А., Тюрин В.Н. 2020. Физико-химические свойства подтоварных вод (южная часть Сургутской низины Западной Сибири). В кн.: Безопасный Север – чистая Арктика. III Всероссийская научно-практическая конференция, Сургут, 11–12 ноября 2020. Сургут, Сургутский государственный университет: 145–149.
- Бузмаков С.А., Андреев Д.Н., Назаров А.В., Дзюба Е.А., Шестаков И.Е., Куюкина М.С., Елькин А.А., Егорова Д.О., Хотяновская Ю.В. 2021. Реакция разных тест-объектов на

- экспериментальное загрязнение почв нефтью. Экология, 4: 254–262. <https://doi.org/10.31857/S0367059721040053>
- Валиуллина А.М. 2020. Биотестирование как метод экологического мониторинга. Научно-практические исследования, 8–3(31): 32–34.
- Даянов Д.И., Юмагулова Э.Р. 2017. Биохимические особенности растений в условиях влияния подтоварных вод. В кн.: Биология. Экология. География. Картография. Безопасность жизнедеятельности. Энергетика. Электротехника. Нефтегазовое дело. XIX Всероссийская студенческая научно-практическая конференция Нижневартковского государственного университета, Нижневартовск, 04–05 апреля 2017. Нижневартовск, Нижневартовский государственный университет: 348–351.
- Дзюба Е.А. 2014. Биотестирование как метод мониторинга экологических систем. Антропогенная трансформация природной среды, 1: 46–50.
- Кучин Л.С., Немчанинова Е.А. 2023. Биотестирование реки Ивы и ее притоков методом измерения оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer). Антропогенная трансформация природной среды, 9(1): 46–53. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-1-46-53>
- Маячкина Н.В., Бакина Л.Г., Брянцев А.В., Явид Е.Я., Мязин В.А., Горохов С.А., Лашков Р.А. 2024. Опыт оценки токсичности пластовой (подтоварной) воды ТПП «ЛУКОЙЛ-Ухтанефтегаз» для окружающей среды. Экология и промышленность России, 28(3): 38–43. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-3-38-43>
- Мещурова Т.А., Ходяшев М.Б. 2018. К вопросу о пластовой и подтоварной воде. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства, 4: 68–71. <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2018-14068>
- Романова К.А. 2021. Влияние солевого загрязнения на биологическую продуктивность и морфологию растений в модельных опытах. В кн.: Научный потенциал молодёжных исследований. V Международная научно-практическая конференция, Петрозаводск, 11 ноября 2021. Петрозаводск, Международный центр научного партнерства «Новая Наука»: 525–532.
- Сергеев М.А., Давыденко Л.В. 2016. Биотестирование почв на проростках семян кресс-салата. Юный ученый, 5(8): 68–71.
- Хаматова А.В. 2023. Оценка качества вод и донных отложений р. Каменка методом биотестирования. Антропогенная трансформация природной среды, 9(1): 54–64. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-1-54-64>
- Buzmakov S.A., Egorova D.O., Khotyanovskaya Y.V., Andreev D.N., Dziuba E.A., Shestakov I.E., Ivshina I.B., Kuyukina M.S., Elkin A.A., Nazarov A.V. 2021. Ecological Criteria for Assessing the Content of Petroleum Hydrocarbons in the Main Soils of Coniferous-Deciduous Forests and Forest Steppe. Environmental geochemistry and health, 43: 5099–5118. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00998-9>

References

- Aleksandrova V.V., Tsyganova V.I. 2021. Otsenka toksichnosti zagryaznennykh podtovarnoy vody na test-ob"yekte Ceriodaphnia Affinis [Evaluation of the Toxicity of Soils Contaminated with Produced Water on the Test Object Ceriodaphnia Affinis]. Zаметki uchenogo, 8: 460–466.
- Alieva S.A., Tyurin V.N. 2020. Physical and Chemical Properties of Produced Waters (Southern Part of the Surgutsk Bottom of Western Siberia). In: Safe North – Clean Arctic. III All-Russian Scientific and Practical Conference, Surgut, 11–12 November 2020. Surgut, Publ. Surgutskiy gosudarstvennyy universitet: 145–149 (in Russian).
- Buzmakov S.A., Andreev D.N., Nazarov A.V., Dziuba E.A., Shestakov I.E., Kuyukina M.S., El'kin A.A., Egorova D.O., Khotyanovskaya Y.V. 2021. Responses of Different Test Objects to Experimental Soil Contamination with Crude Oil. Russian Journal of Ecology, 52(4): 267–274 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S1067413621040056>.
- Valiullina A.M. 2020. Biotestirovaniye kak metod monitoringa okruzhayushchey sredy [Biotesting as a Method of Environmental Monitoring]. Nauchno-prakticheskiye issledovaniya, 8–3(31): 32–34.
- Dayanov D.I., Yumagulova E.R. 2017. Biokhimicheskiye osobennosti rasteniy v usloviyakh podtovarnoy vody [Biochemical Peculiarities of Plants Under the Influence of Backwaters]. In: Biologiya. Ekologiya. Geografiya. Kartografiya. Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti. Energetika. Elektrotekhnika. Neftegazovoye delo [Biology. Ecology. Geography. Cartography. Life safety. Power engineering.

- Electrical engineering. Oil and gas engineering]. XIX All-Russian Student Scientific and Practical Conference of Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, 4–5 April 2017. Nizhnevartovsk, Publ. Nizhnevartovskiy gosudarstvennyy universitet: 348–351.
- Dzyuba E.A. 2014. A Bioassay as the Method of Ecological Systems Monitoring. Anthropogenic Transformation of Nature, 1: 46–50 (in Russian).
- Kuchin L.S., Nemchaninova E.A. 2023. Biotesting of the Iva River and Its Tributaries by Measuring the Optical Density of *Chlorella vulgaris* Beijer. Anthropogenic Transformation of Nature, 9(1): 46–53 (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-1-46-53>
- Maiachkina N.V., Bakina L.G., Briantsev A.V., Yavid E.Ya., Myazin V.A., Gorokhov S.A., Lashkov R.A. 2024. Experience in Assessing the Toxicity of Formation (Produced) Water of the LUKOIL-Ukhtaneftgaz RPC for the Environment. Ecology and Industry of Russia, 28(3): 38–43 (in Russian). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-3-38-43>
- Meshchurova T.A., Khodiashev M.B. 2018. To Question about Stratal and Subcommodity Water. Ekologicheskaya bezopasnost' stroitel'stva i gorodskogo khozyaystva, 4: 68–71 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/1816-1863-2018-14068>
- Romanova K.A. 2021. The Effect of Salt Pollution on Biological Productivity and Morphology of Plants in the Model Experiment. In: Scientific Potential of Youth Research. V International Scientific and Practical Conference, Petrozavodsk, 11 November 2021. Petrozavodsk, Publ. Mezhdunarodnyy tsentr nauchnogo partnerstva «Novaya Nauka»: 525–532 (in Russian).
- Sergeyev M.A., Davydenko L.V. 2016. Biotestirovaniye pochv na prorstkakh semyan kress-salata [Biotesting of Soils on Seedlings of Watercress Seeds]. Yunyy uchenyy, 5(8): 68–71.
- Khamatova A.V. 2023. Assessment of the Quality of Waters and Bottom Sediments of the Kamenka River by Biotesting. Anthropogenic Transformation of Nature, 9(1): 54–64 (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-1-54-64>
- Buzmakov S.A., Egorova D.O., Khotyanovskaya Y.V., Andreev D.N., Dziuba E.A., Shestakov I.E., Ivshina I.B., Kuyukina M.S., Elkin A.A., Nazarov A.V. 2021. Ecological Criteria for Assessing the Content of Petroleum Hydrocarbons in the Main Soils of Coniferous-Deciduous Forests and Forest Steppe. Environmental geochemistry and health, 43: 5099–5118. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00998-9>

*Поступила в редакцию 17.03.2025;
поступила после рецензирования 09.08.2025;
принята к публикации 03.07.2025*

*Received March 17, 2025;
Revised June 09, 2025;
Accepted July 03, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дзиуба Екатерина Алексеевна, кандидат географических наук, доцент кафедры биogeоценологии и охраны природы географического факультета, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

Мельникова Светлана Денисовна, студент, лаборант лаборатории эколого-геоинформационных систем кафедры биogeоценологии и охраны природы географического факультета, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ekaterina A. Dziuba, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Biogeocenology and Nature Conservation, Faculty of Geography, Perm State National Research University, Perm, Russia

Svetlana D. Melnikova, student, Laboratory Assistant at the Laboratory of Ecological and Geoinformation Systems, Department of Biogeocenology and Nature Protection, Faculty of Geography, Perm State National Research University, Perm, Russia