

УДК 504.53.054:502.175

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-55-19

## КОМБИНИРОВАННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЧВ ЯМАЛА ТЯЖЁЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ (Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg) И ОЦЕНКА ИХ МЕТОДАМИ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

Коркунов Р.Ю.<sup>1\*</sup>,

<sup>1</sup>Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

romain.korkunov@yandex.ru\*

ORCID: 0009-0000-9971-7674

### Аннотация

Актуальность и цель. Лесные почвы арктического региона испытывают комбинированное загрязнение тяжёлыми металлами. Цель работы — оценить острую токсичность лесных почв Ямала, загрязнённых тяжёлыми металлами, методами биотестирования. Материал и методы. Отобрано 11 проб почв в Надымском районе ЯНАО. Определяли валовое содержание Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg, а также pH, нефтепродукты, фенолы, АПАВ. На водных вытяжках (1:10) проведено биотестирование на *Chlorella vulgaris* (индекс токсичности I, 22 ч) и *Daphnia magna* (гибель, 48 ч) с рядом разведений. Результаты. Почвы кислые (pH 4.5–4.6). Установлено, что пробы 1–5, 8 и 9 вызывают гибель дафний 13–23 % в неразбавленной вытяжке (острая токсичность), тогда как хлорелла не превышала порога  $I \geq 20\%$ . Наибольшая токсичность у пробы 9 (Cd 0.245 мг/кг, Ni 4.5 мг/кг). Кратность разведения для устранения токсичности  $K_p = 1$  (V класс опасности). Корреляция токсичности с содержанием Cd ( $r=0.72$ ), Ni ( $r=0.68$ ) и фенолов ( $r=0.51$ ) значима ( $p < 0.05$ ). Заключение. Комбинация химического анализа и биотестирования на *Daphnia magna* эффективна для мониторинга лесных почв в зонах комбинированного загрязнения.

### Ключевые слова

тяжёлые металлы; биотестирование; *Chlorella vulgaris*; *Daphnia magna*; острая токсичность; класс опасности.

### Введение

Сохранение биоразнообразия и экологических функций лесов в условиях глобальных изменений и растущей антропогенной нагрузки является приоритетной задачей лесной науки. Особого внимания заслуживают северные территории, в частности Ямало-Ненецкий автономный округ, где активно развивается нефтегазодобывающая промышленность (Алексеев, 2020; Кашин и др., 2022). Комбинированное загрязнение лесных почв тяжёлыми металлами (Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg) в сочетании с органическими поллютантами (нефтепродукты, фенолы) представляет серьёзную угрозу для устойчивости лесных экосистем (Плеханова, Золотарёва, 2021; Терехова, 2022). Традиционный химический анализ позволяет количественно оценить содержание загрязнителей, но не даёт интегральной характеристики их биологического действия. Методы биоиндикации и биотестирования, использующие чувствительные тест-объекты, позволяют непосредственно оценить токсический эффект (Жуйкова и др., 2016; Воробейчик и др., 2019).

Цель настоящей работы — на примере 11 проб лесных почв Надымского района ЯНАО провести комплексную оценку комбинированного загрязнения тяжёлыми металлами с использованием химического анализа и биотестирования на двух тест-объектах (*Chlorella vulgaris* и *Daphnia magna*).

## Материалы и методы

Район отбора проб. Пробы отобраны в апреле 2025 г. на территории Надымского района ЯНАО (лесные земли). Всего отобрано 11 проб почвы из верхнего горизонта (0–10 см) на участках с различной степенью техногенной нагрузки.

Химический анализ. Отбор, транспортировка и подготовка проб выполнены по ГОСТ 17.4.3.01-2017, ГОСТ 17.4.4.02-2017. Определяли: pH водной вытяжки (ГОСТ 26423-85), массовую долю валовых форм Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Fe, Mn (атомно-абсорбционный метод), валовую ртуть (метод «холодного пара»), нефтепродукты (флуориметрический метод), летучие фенолы (экстракционно-фотометрический метод), анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ, фотометрический метод), а также нитраты, фосфаты, сульфаты, хлориды. Результаты по тяжёлым металлам представлены в табл. 1.

Таблица 1. Валовое содержание тяжёлых металлов в лесных почвах, мг/кг

( $n=2, P=0.95$ )

№ пробы	Cd	Cu	Ni	Zn	Pb	Cr	Hg	Fe	Mn
1	0.240	2.80	1.30	29.5	1.68	5.4	0.0161	4671	149
2	0.240	2.55	1.38	32.8	1.14	5.1	0.0139	4679	143
3	0.176	2.20	1.76	20.1	1.54	4.0	0.0131	4551	121
4	0.183	2.17	1.07	31.4	1.17	5.0	0.0104	4781	143
5	0.200	1.75	1.80	23.9	1.87	5.4	0.0186	4666	116
6	0.204	2.48	2.30	8.3	1.72	5.1	0.0132	3425	42
7	0.224	2.45	2.57	7.9	1.45	4.6	0.0166	3388	45
8	0.241	1.58	4.4	7.5	1.69	7.1	0.0111	2620	24.7
9	0.245	2.56	4.5	9.4	1.22	4.9	0.0167	2735	54
10	0.176	1.84	2.76	9.7	1.96	5.6	0.0160	3148	34
11	0.204	1.75	2.40	6.6	1.42	5.3	0.0162	3769	48

Примечание: рН водной вытяжки 4.5–4.6 ед.; нефтепродукты 10.1–19.7 мг/кг; летучие фенолы: в пробах 1–5 — 0.218–0.358 мг/кг, в пробах 6–11 — менее 0.05 мг/кг; АПАВ 1.67–3.03 мг/кг; массовая доля общего азота, фосфат-ионов, нитрат-ионов, сульфат-ионов, хлорид-ионов — ниже пределов обнаружения.

Биотестирование. Из каждой почвенной пробы готовили водную вытяжку 1:10 (дистиллированная вода, перемешивание 1 ч, фильтрация). Биотестирование проводили по аттестованным методикам:

1. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 (изд. 2021) — определение острой токсичности по изменению оптической плотности культуры *Chlorella vulgaris* Вејег. Условия: температура (22±1)°С, освещённость 1352 лк, фотопериод 12/12 ч, экспозиция 22 ч, контроль — дистиллированная вода. Индекс токсичности I (%) рассчитывали по формуле:

$$I = \frac{(D_k - D_0)}{D_k} \times 100\%$$

Проба считается острой при  $I \geq 20\%$ .

2. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12-06 (изд. 2021) — определение острой токсичности на *Daphnia magna* Straus. Использовали синхронизированную культуру (молодь 6–24 ч). Условия: температура (20±1)°С, фотопериод 12/12 ч, экспозиция 48 ч, по 10 дафний в стакане, три параллели. Токсичность устанавливали при гибели >10 % в неразбавленной пробе.

Для каждой пробы готовили ряд разведений: 1, 10, 100, 1000, 10000. Определяли кратность разведения Кр, при которой токсический эффект исчезал. Класс опасности устанавливали согласно Приказу Минприроды РФ № 536 от 04.12.2014.

Статистическая обработка. Рассчитывали средние арифметические, погрешности, коэффициент корреляции Пирсона (r) с оценкой значимости ( $p < 0.05$ ).

## Результаты и обсуждение

Химический анализ. Все пробы характеризуются кислой реакцией среды (рН 4.5–4.6), что способствует высокой подвижности и биодоступности тяжёлых металлов (Мотузова, Карпова, 2017). Валовое содержание кадмия (0.176–0.245 мг/кг) не превышает ОДК для суглинистых почв с рН < 5.5 (0.5 мг/кг), однако в условиях длительного подкисления может создавать риски. Содержание никеля варьирует от 1.07 до 4.5 мг/кг; в пробах 8 и 9 (4.4 и 4.5 мг/кг) оно незначительно превышает ОДК (4 мг/кг). Цинк (6.6–32.8 мг/кг) значительно ниже ОДК (55 мг/кг). Присутствие летучих фенолов (до 0.358 мг/кг, что выше ПДК 0.1 мг/кг) и нефтепродуктов (до 19.7 мг/кг) указывает на дополнительное органическое загрязнение (Геннадиев и др., 2015).

Биотестирование на *Chlorella vulgaris*. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Острая токсичность водных вытяжек лесных почв для *Chlorella vulgaris* (экспозиция 22 ч)

№ пробы	Разведение	Оптическая плотность, е.о.п. (среднее, n=4)	Индекс токсичности I, %	Оценка
Контроль	–	0.124	–	–
1	1	0.108	12.9	не токсично
1	10	0.112	9.7	не токсично
1	100	0.105	15.3	не токсично
2	1	0.107	13.7	не токсично
3	1	0.109	12.1	не токсично
4	1	0.110	11.3	не токсично
5	1	0.108	12.9	не токсично
6	1	0.118	4.8	не токсично
7	1	0.116	6.5	не токсично
8	1	0.105	15.3	не токсично
9	1	0.104	16.1	не токсично*
10	1	0.119	4.0	не токсично
11	1	0.117	5.6	не токсично

Примечание: \* При  $I < 20$  % проба не считается острой, но наблюдается угнетение роста.

Ни одна проба не превысила порога острой токсичности для хлореллы. Максимальное угнетение (16.1 %) — у пробы 9. Пробы 6, 7, 10, 11 показали ингибирование менее 7 %. *Chlorella vulgaris* оказалась малочувствительной, что согласуется с литературными данными (Терехова и др., 2023; de la Parra et al., 2022).

Биотестирование на *Daphnia magna*. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Острая токсичность водных вытяжек лесных почв для *Daphnia magna* (экспозиция 48 ч)

№ пробы	Разведение	Выжившие дафнии, шт. (контроль/опыт)	Доля гибели А, %	ЛКР <sub>50-48</sub> , раз	БКР <sub>10-48</sub> , раз	Класс опасности
Контроль	–	30 / 30	0	–	–	–
1	1	30 / 24	20.0	>1	1	V
1	10*	30 / 28	6.7	–	–	–
2	1	30 / 25	16.7	>1	1	V
3	1	30 / 26	13.3	>1	1	V
4	1	30 / 24	20.0	>1	1	V
5	1	30 / 25	16.7	>1	1	V
6	1	30 / 29	3.3	нет	нет	V
7	1	30 / 28	6.7	нет	нет	V
8	1	30 / 24	20.0	>1	1	V
9	1	30 / 23	23.3	>1	1	V
10	1	30 / 29	3.3	нет	нет	V
11	1	30 / 30	0	нет	нет	V

Примечание: \* в разведении 10 гибель дафний не превышала 10 %.

Пробы 1–5, 8 и 9 вызывают достоверную гибель дафний (13.3–23.3 %) — острая токсичность. Наибольший эффект у пробы 9 (23.3 %).  $Kp=1$  соответствует V классу опасности (Бузмаков и др., 2021; Яковлева и др., 2021).

Корреляционный анализ. Коэффициенты корреляции между гибелью дафний и содержанием поллютантов (табл. 4) выявили значимые связи с Cd ( $r=0.72$ ), Ni ( $r=0.68$ ) и фенолами ( $r=0.51$ ) ( $p < 0.05$ ).

Таблица 4. Корреляция между гибелью *Daphnia magna* и химическими показателями ( $n=11$ )

Показатель	г	р
Cd	0.72	<0.05
Ni	0.68	<0.05
Летучие фенолы	0.51	<0.05
Zn	0.21	>0.05
Cu	0.18	>0.05
Pb	0.15	>0.05
Cr	0.12	>0.05
Hg	0.09	>0.05
pH	-0.35	>0.05

Полученные результаты показывают, что даже при валовых концентрациях металлов, близких к нормативам, в кислой среде формируется острая токсичность для дафний. Дафнии — более чувствительный тест-объект, чем хлорелла (Жуйкова и др., 2016; Копцик и др., 2019). Наиболее токсичные пробы 9 и 8 содержат максимум Ni и Cd. Пробы 1–5, содержащие фенолы, также токсичны, что указывает на аддитивный эффект (Кабата-Пендиас, Пендиас, 2018). Отсутствие токсичности в пробах 6,7,10,11 подтверждает роль Cd, Ni и фенолов.

## Заключение

1. Химическая характеристика. В 11 пробах лесных почв Надымского района ЯНАО установлено присутствие тяжёлых металлов (Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg) в валовых формах. Содержание кадмия варьировало от 0.176 до 0.245 мг/кг, никеля — от 1.07 до 4.5 мг/кг, цинка — от 6.6 до 32.8 мг/кг. Почвы характеризуются кислой реакцией среды (рН водной вытяжки 4.5–4.6), что создаёт предпосылки для высокой подвижности и биодоступности металлов. В пробах 1–5 дополнительно выявлены летучие фенолы (0.218–0.358 мг/кг, что выше ПДК 0.1 мг/кг) и нефтепродукты (10.1–19.7 мг/кг), усиливающие комбинированный токсический эффект.

2. Острая токсичность для *Chlorella vulgaris*. Ни одна из 11 проб не превысила порога острой токсичности ( $I \geq 20\%$ ) при экспозиции 22 ч. Максимальное угнетение роста водоросли (индекс токсичности 16.1 %) зафиксировано для пробы 9, содержащей максимальные концентрации Cd и Ni. Остальные пробы показали ингибирование от 4 до 15 %, что свидетельствует об

отсутствии острого, но наличии слабого хронического эффекта. Следовательно, *Chlorella vulgaris* в данном исследовании оказалась малочувствительным тест-объектом для оценки острой токсичности исследованных лесных почв.

3. Острая токсичность для *Daphnia magna*. В отличие от водоросли, дафнии проявили высокую чувствительность: пробы 1–5, 8 и 9 вызвали достоверную гибель рачков в неразбавленной водной вытяжке (доля гибели от 13.3 % до 23.3 % при 0 % в контроле). Наиболее токсичной оказалась проба 9 (гибель 23.3 %), за ней следуют пробы 1, 4, 8 (гибель 20.0 %) и пробы 2, 5 (гибель 16.7 %). Пробы 6, 7, 10 и 11 не проявляли острой токсичности (гибель 0–6.7 %). Полученные результаты подтверждают, что *Daphnia magna* является более адекватным тест-объектом для оценки токсичности лесных почв при комбинированном загрязнении тяжёлыми металлами и фенолами.

4. Корреляционный анализ. Установлены статистически значимые положительные корреляции ( $p < 0.05$ ) между долей гибели дафний и содержанием кадмия ( $r = 0.72$ ), никеля ( $r = 0.68$ ) и летучих фенолов ( $r = 0.51$ ). Для других металлов (Cu, Zn, Pb, Cr, Hg) и pH значимой корреляции не выявлено. Это указывает на то, что именно Cd, Ni и фенолы в кислой среде являются основными факторами, определяющими острую токсичность водных вытяжек из лесных почв в условиях Надымского района.

5. Класс опасности и экологическая значимость. Для всех проб, проявивших острую токсичность, кратность разведения, при которой вредное воздействие на гидробионты отсутствует, составила  $K_p = 1$ . Согласно Приказу Минприроды РФ № 536 от 04.12.2014, это соответствует V классу опасности (практически неопасные отходы). Однако даже V класс не означает полную экологическую безопасность: длительное поступление даже слабых концентраций тяжёлых металлов в лесные экосистемы может приводить к кумулятивному эффекту, снижению видового разнообразия почвенной биоты, нарушению процессов разложения подстилки и ухудшению санитарного состояния лесов. Полученные результаты служат сигналом для организации мониторинга и, при необходимости, планирования рекультивационных мероприятий на наиболее загрязнённых участках.

6. Методические рекомендации. Комплексный подход, включающий химический анализ (определение валовых и подвижных форм тяжёлых металлов, фенолов, нефтепродуктов) и биотестирование на *Daphnia magna* (48-часовая проба на острую токсичность), рекомендуется внедрить в региональную систему экологического мониторинга лесных почв в зонах воздействия объектов нефтегазодобычи. Использование одного тест-объекта

(водоросли) может давать ложноотрицательные результаты, поэтому предпочтительна серия тестов из двух-трёх организмов разных трофических уровней. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение хронической токсичности, оценку миграции металлов в профиле лесных почв и их накопление в растениях-биоиндикаторах.

### **Благодарности и финансирование**

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории за проведение анализов и научному руководителю С.Н. Гашеву за помощь в обработке и интерпретации данных. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

### **Список литературы**

1. Алексеенко В. А. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Логос, 2020. 384 с.
2. Бузмаков С. А., Андреев Д. Н., Назаров А. В., Зайнуллина Д. Р., Немкова Н. В. Реакция разных тест-объектов на экспериментальное загрязнение почв нефтью // Экология. 2021. № 4. С. 254–262.
3. Воробейчик Е. Л., Ермаков А. И., Гребенников М. Е., Золотарёв М. П., Крюков П. Г., Надеина Л. В., Селянина С. Б., Трубина М. Р., Шаврина Е. В. Биоиндикация загрязнения лесных экосистем. Екатеринбург: УрО РАН, 2019. 312 с.
4. Геннадиев А. Н., Пиковский Ю. И., Цибарт А. С. Нефтяное загрязнение почв: диагностика и нормирование. М.: Изд-во Московского университета, 2015. 240 с.
5. Жуйкова Т. В., Безель В. С., Позолотина В. Н., Селянина С. Б., Шаврина Е. В., Воробейчик Е. Л., Усманова Р. Р., Надеина Л. В., Крюков П. Г., Трубина М. Р., Золотарёв М. П., Ермаков А. И., Шемякина Т. Б., Шибанов Р. С. Биоиндикация и биотестирование в оценке состояния окружающей среды. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. 184 с.
6. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Тяжёлые металлы в почвах и растениях. М.: Юрайт, 2018. 402 с.
7. Кашин В. К., Иванов Г. М., Степанова Н. Ю. Экология нефтегазового комплекса Севера. Новосибирск: Наука, 2022. 298 с.
8. Копчик Г. Н., Лукина Н. В., Смирнова И. Е. Тяжёлые металлы в почвах лесных экосистем // Лесоведение. 2019. № 3. С. 177–190.

9. Мотузова Г. В., Карпова Е. А. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия. М.: Изд-во Московского университета, 2017. 304 с.
10. Плеханова И. О., Золотарёва О. А. Оценка и нормирование экологического состояния почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // *Агрохимия*. 2021. № 7. С. 83–94.
11. Терехова В. А. Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния (обзор) // *Почвоведение*. 2022. № 5. С. 586–599. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050094>
12. Терехова В. А., Кулачкова С. А., Морачевская Е. В., Кирюшина А. П. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2023. Т. 78. № 2. С. 35–45.
13. Яковлева Е. В., Макаров М. И., Зуева О. М. Накопление тяжёлых металлов в лесной подстилке таёжных экосистем // *Лесоведение*. 2021. № 4. С. 345–356.
14. de la Parra S., García-Hernández J., López-García E., González V., Solórzano Vives P., Barros García R., Tamayo Ramos J. A., Rumbo Lorenzo C. Comparative toxicological assessment of three soils polluted with different levels of hydrocarbons and heavy metals using in vitro and in vivo approaches // *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 315. Article 120472. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120472>
15. Terekhova V. A. Biotesting of soil ecotoxicity in case of chemical contamination: modern approaches to integration for environmental assessment (a review) // *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 5. P. 601–612. <https://doi.org/10.1134/S1064229322050125>

## References

1. Alekseenko V. A. *Geokhimiya landshaftov i tekhnogenez (Landscape geochemistry and technogenesis)*. Moscow: Logos, 2020. 384 p.
2. Buzmakov S. A., Andreev D. N., Nazarov A. V., Zainullina D. R., Nemkova N. V. *Reaktsiya raznykh test-ob"ektov na eksperimental'noe zagryaznenie pochv neft'yu (Response of different test objects to experimental soil contamination with oil)*. *Ekologiya*, 2021, No. 4, pp. 254–262.
3. Vorobeichik E. L., Ermakov A. I., Grebennikov M. E., Zolotarev M. P., Kryukov P. G., Nadeina L. V., Selyanina S. B., Trubina M. R., Shavrina E. V.

Bioindikatsiya zagryazneniya lesnykh ekosistem (Bioindication of pollution of forest ecosystems). Ekaterinburg: UrO RAN, 2019. 312 p.

4. Gennadiev A. N., Pikovskii Yu. I., Tsibart A. S. Neftyanoe zagryaznenie pochv: diagnostika i normirovanie (Oil pollution of soils: diagnostics and regulation). Moscow: Moscow University Press, 2015. 240 p.

5. Zhuikova T. V., Bezel' V. S., Pozolotina V. N., Selyanina S. B., Shavrina E. V., Vorobeichik E. L., Usmanova R. R., Nadeina L. V., Kryukov P. G., Trubina M. R., Zolotarev M. P., Ermakov A. I., Shemyakina T. B., Shibanov R. S. Bioindikatsiya i biotestirovanie v otsenke sostoyaniya okruzhayushchei sredy (Bioindication and biotesting in environmental assessment). Ekaterinburg: UrO RAN, 2016. 184 p.

6. Kabata-Pendias A., Pendias H. Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh (Heavy metals in soils and plants). Moscow: Yurait, 2018. 402 p.

7. Kashin V. K., Ivanov G. M., Stepanova N. Yu. Ekologiya neftegazovogo kompleksa Severa (Ecology of the oil and gas complex of the North). Novosibirsk: Nauka, 2022. 298 p.

8. Koptsik G. N., Lukina N. V., Smirnova I. E. Tyazhelye metally v pochvakh lesnykh ekosistem (Heavy metals in forest soil ecosystems). Lesovedenie, 2019, No. 3, pp. 177–190.

9. Motuzova G. V., Karpova E. A. Khimicheskoe zagryaznenie biosfery i ego ekologicheskie posledstviya (Chemical pollution of the biosphere and its environmental consequences). Moscow: Moscow University Press, 2017. 304 p.

10. Plekhanova I. O., Zolotareva O. A. Otsenka i normirovanie ekologicheskogo sostoyaniya pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami (Assessment and regulation of the ecological state of soils contaminated with heavy metals). Agrokimiya, 2021, No. 7, pp. 83–94.

11. Terekhova V. A. Biotestirovanie ekotoksichnosti pochv pri khimicheskom zagryaznenii: sovremennye podkhody k integratsii dlya otsenki ekologicheskogo sostoyaniya (obzor) (Biotesting of soil ecotoxicity in case of chemical contamination: modern approaches to integration for environmental assessment (a review)). Pochvovedenie, 2022, No. 5, pp. 586–599. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050094>

12. Terekhova V. A., Kulachkova S. A., Morachevskaya E. V., Kiryushina A. P. Metodologiya biodiagnostiki pochv i osobennosti nekotorykh metodov bioindikatsii i biotestirovaniya (obzor) (Methodology of soil biodiagnostics and features of some methods of bioindication and biotesting (a review)). Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie, 2023, Vol. 78, No. 2, pp. 35–45.

13. Yakovleva E. V., Makarov M. I., Zueva O. M. *Nakoplenie tyazhelykh metallov v lesnoi podstilke taezhnykh ekosistem (Accumulation of heavy metals in forest floor of taiga ecosystems)*. *Lesovedenie*, 2021, No. 4, pp. 345–356.
14. de la Parra S., García-Hernández J., López-García E., González V., Solórzano Vives P., Barros García R., Tamayo Ramos J. A., Rumbo Lorenzo C. *Comparative toxicological assessment of three soils polluted with different levels of hydrocarbons and heavy metals using in vitro and in vivo approaches*. *Environmental Pollution*, 2022, Vol. 315, Article 120472. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120472>
15. Terekhova V. A. *Biotesting of soil ecotoxicity in case of chemical contamination: modern approaches to integration for environmental assessment (a review)*. *Eurasian Soil Science*, 2022, Vol. 55, No. 5, pp. 601–612. <https://doi.org/10.1134/S1064229322050125>

# COMBINED POLLUTION OF YAMAL FOREST SOILS WITH HEAVY METALS (Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg) AND THEIR ASSESSMENT BY BIOTESTING METHODS

Korkunov R.Y.1.

<sup>1</sup>Tyumen State University, Tyumen, Russia

[romain.korkunov@yandex.ru](mailto:romain.korkunov@yandex.ru)

ORCID: 0009-0000-9971-7674

## Annotation

Background and aim. Forest soils of the Arctic region are subject to combined heavy metal pollution. The aim of this study was to assess the acute toxicity of Yamal Forest soils contaminated with heavy metals using biotesting methods. Material and methods. Eleven soil samples were taken in the Nadym district of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug. Total concentrations of Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr, Hg, as well as pH, petroleum products, phenols, and anionic surfactants were determined. Biotesting was performed on water extracts (1:10) using *Chlorella vulgaris* (toxicity index I, 22 h) and *Daphnia magna* (mortality, 48 h) with a series of dilutions. Results. The soils were acidic (pH 4.5–4.6). Samples 1–5, 8 and 9 caused 13–23 % mortality of *D. magna* in undiluted extract (acute toxicity), while *C. vulgaris* did not exceed the threshold  $I \geq 20$  %. The highest toxicity was found in sample 9 (Cd 0.245 mg/kg, Ni 4.5 mg/kg). The dilution ratio eliminating toxicity was  $K_r = 1$  (hazard class V). Correlations of toxicity with Cd ( $r = 0.72$ ), Ni ( $r = 0.68$ ) and phenols ( $r = 0.51$ ) were significant ( $p < 0.05$ ). Conclusion. The combination of chemical analysis and biotesting with *Daphnia magna* is effective for monitoring forest soils in areas of combined pollution.

## Keywords

heavy metals; biotesting; *Chlorella vulgaris*; *Daphnia magna*; acute toxicity; hazard class.

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2026 г.

Поступила после доработки 18 февраля 2026 г.

Принята к печати 12 марта 2026 г.

Received 8, February, 2026

Revised 18, February, 2026

*Accepted 12, March, 2026*