

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 504.054:574.24

DOI: 10.15372/GIPR20250214

Т.В. БАРДИНА, В.И. БАРДИНА, В.В. КУЛИБАБА

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН —
научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН,
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18, Россия,
bardinatv@mail.ru, vicula128@mail.ru, 2011valk@gmail.com

БИОТЕСТИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИИ ОБЪЕКТА НАКОПЛЕННОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВРЕДА В БАСЕЙНЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Осуществлен экосистемный подход к оценке объекта накопленного экологического вреда (НЭВ), заключающийся в возможности применения методов биотестирования совместно с химико-аналитическими методами для экологической оценки почвогрунтов и донных отложений закрытой санкционированной свалки, расположенной в бассейне Финского залива. Выявлено, что причиной загрязнения территории бассейна является длительное хранение свалочных масс смешанного состава без соблюдения технологий природоохранной защиты окружающей среды. Установлено, что действующая нормативно-методическая база не обеспечивает достоверного учета факторов влияния объектов НЭВ, что приводит к искажениям параметров экобезопасности территорий и оценок воздействия на вмещающие их геосистемы. На объектах накопленного экологического вреда могут образовываться новые загрязняющие вещества, обладающие высокой токсичностью. Их наличие невозможно предсказать только на основе химического анализа. В связи с этим в систему экологического контроля необходимо включать интегральные методы оценки токсичности природных сред, к которым относится метод биотестирования. Биотестирование, которое выполняет функцию тактического контроля, позволяет приблизиться к оценке воздействия объектов НЭВ на экосистему и достаточно быстро установить опасность объекта для окружающей среды. В настоящей работе экотоксикологические исследования почвогрунтов и донных грунтов методами биотестирования проведены с использованием набора биотест-систем, включающих представителей различных трофических уровней (рачков, инфузорий, водорослей и семян высших растений). В исследовании использованы элюатные и контактные методы биотестирования, которые позволили определить наиболее чувствительные биотесты. Полученные результаты исследования дают возможность правильно обосновать научно-прикладные решения по восстановлению кумулятивного техногенного фона природно-хозяйственных систем, расположенных в бассейне Финского залива.

Ключевые слова: токсичность, почвогрунт, донный грунт, тест-культура, элюатные методы, контактные методы.

T.V. BARDINA, V.I. BARDINA, V.V. KULIBABA

Saint-Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences — Scientific Research Centre
for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences, 197110, St. Petersburg, ul. Korpusnaya, 18, Russia,
bardinatv@mail.ru, vicula128@mail.ru, 2011valk@gmail.com

BIOASSAY AS A METHOD FOR ASSESSING THE STATE OF THE TERRITORY OF THE OBJECT OF ACCUMULATED ENVIRONMENTAL DAMAGE IN THE GULF OF FINLAND BASIN

The ecosystem approach to assessing the object of accumulated environmental damage (AED) has been implemented; it consists in the possibility of using bioassay methods together with chemical-analytical methods for the environmental assessment of soils and bottom sediments of the closed authorized landfill located in the Gulf of Finland basin. It has been revealed that the cause of pollution of the basin territory is the long-term storage of mixed landfill masses without observing environmental protec-

tion technologies. It has been established that the current regulatory and methodological framework does not provide for reliable accounting of the factors of influence of AED objects, which leads to distortions of the parameters of eco-safety of territories and assessments of the impact on the surrounding geosystems. New pollutants with high toxicity can be formed at the objects of accumulated environmental damage. Their presence cannot be predicted only on the basis of chemical analysis. In this regard, the environmental control system should involve integral methods for assessing the toxicity of natural environments, which include bioassay. Bioassay, which performs the function of tactical control, allows us to approach the assessment of the impact of AED objects on the ecosystem and to quickly establish the danger of the object for the environment. In this work, ecotoxicological studies of soils and bottom soils by bioassay methods were carried out using a set of biotest systems including representatives of different trophic levels (crustaceans, infusoria, algae, and seeds of higher plants). The study used eluate and contact bioassay methods, which enabled to determine the most sensitive biotests. The obtained research results make it possible to properly justify scientific and applied solutions for the restoration of the cumulative technogenic background of natural and economic systems located in the Gulf of Finland basin.

Keywords: toxicity, soil, bottom soil, test culture, eluate methods, contact methods.

ВВЕДЕНИЕ

Территория бассейна Финского залива Балтийского моря долгие годы достаточно интенсивно подвергалась хозяйственному освоению. В связи с этим во второй половине XX в. на этой территории образовались многочисленные объекты накопленного экологического вреда (НЭВ). К объектам НЭВ относятся загрязненные территории, где в результате прошлой хозяйственной деятельности накапливаются различные токсичные вещества как неорганической, так и органической природы: нефтяные углеводороды, тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды и другие высокотоксичные вещества. Эти объекты являются техногенно измененной частью геосистем, характеризующейся такими отклонениями состава и структуры, которые препятствуют использованию данных объектов по целевому назначению, и превращаются в мощный источник экологической опасности. Борьбу с влиянием этих объектов на окружающую среду инициируют природоохранные ведомства разных стран, в том числе и в России [1].

Оценке загрязнения окружающей среды в бассейнах рек в результате воздействия антропогенных объектов в настоящее время уделяется большое внимание [2, 3].

В процессе инвентаризации и полевых съемок в бассейне Финского залива выявлено около 200 объектов НЭВ, среди которых на закрытые полигоны приходится 1,91 %, а на закрытые свалки промышленных отходов — 1,44 % от распределения объектов с признаками НЭВ. Все объекты НЭВ находятся в различных стадиях своего жизненного цикла и имеют соответствующий статус:

- первый этап — статус строительства объекта природоохранного назначения (1–2 года);
- второй этап — статус объекта промышленного объекта природоохранного назначения (10–20 лет), этап завершается консервацией или рекультивацией объекта;
- третий этап — статус объекта НЭВ — после закрытия полигона до времени затухания биохимических процессов в свалочном теле (15–20 лет);
- четвертый этап — статус объекта НЭВ — инженерная адаптация (рекультивация) объекта к окружающей среде после затухания биогеохимических процессов (20–40 лет).

В бассейне Финского залива преобладает водный режим промывного типа, при котором вся толща отходов пропитывается водой и происходит вынос растворимых загрязняющих веществ сквозь толщу отходов и через боковой сток. В связи с тем, что уровень грунтовых вод расположен относительно близко к поверхности, даже после закрытия объектов НЭВ они могут представлять значительную потенциальную опасность вследствие высокой миграционной способности высокотоксичных форм вторичного загрязнения многих токсичных веществ из тела объекта при разложении отдельных компонентов отходов [4, 5].

Для объектов НЭВ, расположенных на водосборной территории и представляющих собой источники загрязнения грунтовых и поверхностных вод, необходимо разработать мероприятия по снижению их воздействия на соседние территории. Также необходимы разработки эффективных программ экологической реабилитации закрытых объектов хранения отходов и систем экологического мониторинга полигонов с учетом динамического развития факторов накопления негативных экологических последствий и геоэкологических условий территории размещения таких объектов [6].

Для экологического контроля загрязненных почв, почвогрунтов и отходов традиционно используются химико-аналитические исследования. Однако ограниченный список действующих нормативов, а также тот факт, что в компонентах окружающей среды объектов НЭВ могут присутствовать загрязняющие вещества неизвестного состава, не позволяют делать экологический прогноз на основе только химического анализа [7].

Результаты химико-аналитических исследований на объектах НЭВ показывают, что в окружающей среде присутствуют узнаваемые загрязняющие вещества в определенных концентрациях. Но эти исследования не всегда позволяют выявить превышение установленных нормативов содержания токсичных компонентов. Также необходимо учитывать тот фактор, что в почвах, почвогрунтах и отходах таких объектов могут образоваться новые поллютанты, обладающие наибольшим токсическим эффектом.

На современном этапе биотестирование считается одним из наиболее эффективных методов интегральной оценки токсичности компонентов окружающей среды, таких как загрязненные почвы, почвогрунты, отходы, в которых могут накапливаться различные токсичные вещества (тяжелые металлы, нефтепродукты, пестициды, ПАУ и др.). Биотестирование выполняет функцию тактического контроля происходящего загрязнения, нацеленного на получение быстрого индикаторного сигнала о токсичности объекта исследования, и в короткие сроки позволяет выявить его опасность для окружающей среды [8]. Достоверность результатов биотестирования зависит прежде всего от правильно выбранных тест-культур и их тест-функций. При выборе биотестов с целью дальнейшего применения при наблюдении за экологическим состоянием компонентов окружающей среды используются все доступные методики биотестирования для выявления наиболее чувствительных [9]. Для этого при создании комплекса биотест-систем для экотоксикологического анализа объектов необходимо применять стандартизированные методы биотестирования с использованием тест-организмов из различных систематических групп [10]. В настоящее время адаптация методов биотестирования для оценки экологического состояния компонентов объектов НЭВ с учетом региональных геоэкологических параметров является актуальным направлением исследований в области охраны окружающей среды.

Цель данной работы — обосновать возможность оценить экологическое состояние компонентов объекта НЭВ, который находится в стадии консервации, с помощью комплекса биотест-систем, что позволит определить необходимость работ по улучшению экологической безопасности территории и восстановлению хозяйственной ценности земель.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

В ходе работы был исследован объект НЭВ в фазе жизненного цикла «Самовосстановление без специальных рекультивационных мероприятий», расположенный в Ленинградской области на землях лесного фонда (рис. 1).

Площадь участка с накопленным ущербом составляет 4,9 га. Объект относился к полигону приповерхностного размещения (промышленно-бытовой свалке) смешанных отходов, объем которых составляет примерно 1100 тыс. м³. В их составе присутствуют свалочные массы смешанного состава, загрязненные грунты, продукты сложного состава после горения свалочных масс. Общий период эксплуатации объекта составляет около 20 лет. В 2004–2005 гг. на объекте произошло крупное внутри-массовое возгорание свалочных масс с длительным периодом горения в 5 месяцев. Вследствие аварийных воздушно-миграционных выбросов токсичных веществ содержание бенз(а)пирена в воздухе санитарно-защитной зоны варьировалось от 90 до 138 ПДК.

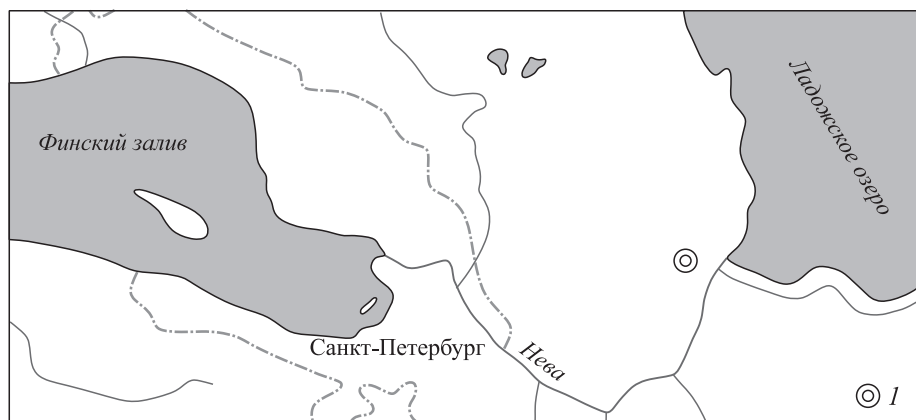


Рис. 1. Схема расположения объекта исследования.

1 — объект исследования.

В настоящее время территория объекта находится в повторной фазе кустарниково-травянистого рудерального зарастания. По всей площади объекта наблюдается разрушение почвенно-грунтового покрова, перекрытие искусственными массами поверхности, накопление смешанных токсичных масс. Основание свалки не имеет требующегося по санитарно-строительным нормам изолирующего экрана. Уязвимыми реципиентами являются Ладожское озеро, находящееся в 1,5 км от полигона, р. Нева (в 2 км), а также население садоводства, расположенного в 1 км от данного объекта. Причиной загрязнения послужило длительное хранение свалочных масс смешанного состава (строительно-промышленные, бытовые) с повышенной токсичностью без соблюдения технологического режима безопасного размещения токсичных отходов.

Для изучения экологического состояния территории были обследованы четыре участка со взятием смешанных проб (рис. 2).

С двух площадок, расположенных на границе и в центральной части объекта, были отобраны пробы почвогрунтов с глубины 0–20 см (площадки № 1 и 2) и пробы (№ 3, 4) донного грунта в канале, дренирующем территорию объекта. Проба № 3 отобрана на границе объекта, проба № 4 — на участке концентрированной разгрузки поверхностного-грунтового стока с территории НЭВ.

Физико-химические и химические методы исследования проб включали определения pH потенциометрическим методом, удельной электропроводности кондуктометрическим методом, валовых форм элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, содержания органических токсикантов (полихлорированные бифенилы, хлорсодержащие пестициды, нефтепродукты) методом газовой хроматографии, 3,4-бенз(а)пирена методом жидкостной хроматографии.

Экотоксикологическая оценка методом биотестирования отобранных проб проводилась в испытательной аналитической лаборатории Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН — научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН (аттестат аккредитации RA.RU.21HC58) с использованием стандартизированных методов элюатного биотестирования с тест-культурами из разных систематических групп: большая дафния (*Daphnia magna* Straus), инфузория-туфелька (*Paramecium caudatum*), микроводоросль хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer), семена овса посевного (*Avena sativa*).

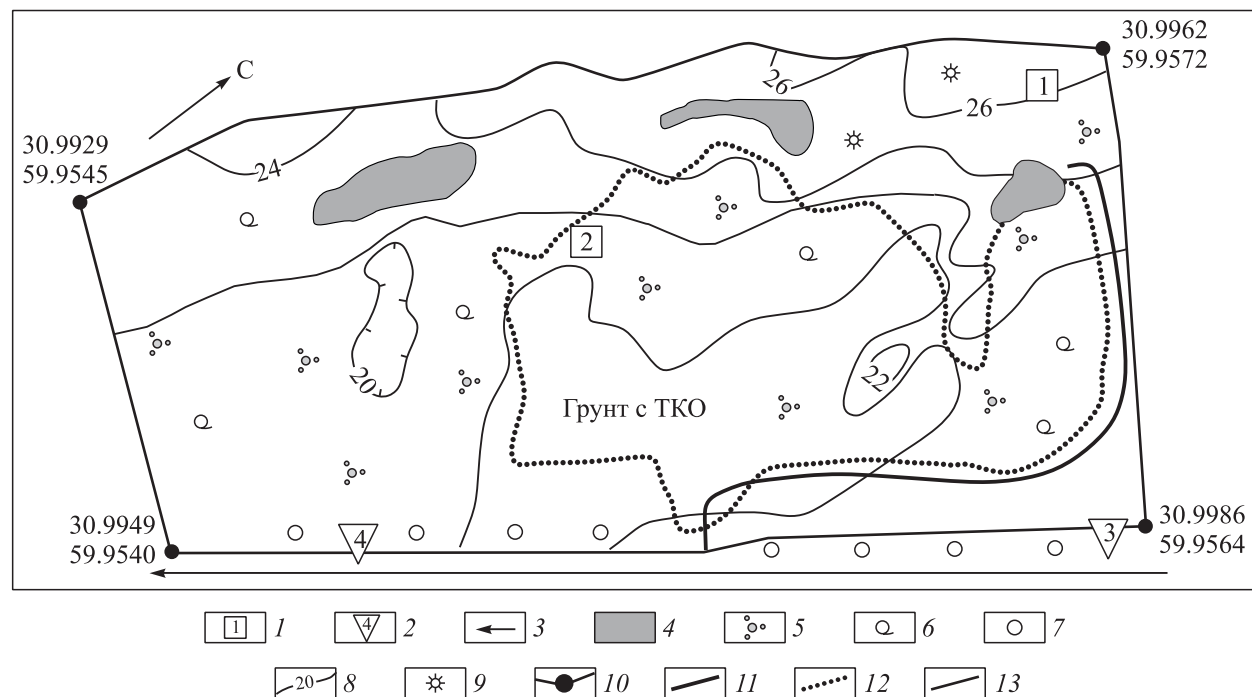


Рис. 2. Схема объекта исследований с участками пробоотбора.

1 — площадка отбора почвенных проб; 2 — точки отбора проб воды и донных грунтов; 3 — мелиоративный канал, направление стока; 4 — отвалы отходов; 5 — кустарник; 6 — редколесье, сосна; 7 — лесозащитная полоса; 8 — изогипсы; 9 — бугры техногенные; 10 — координаты угловых точек границы объекта в СК WGS-84 EPSG:3857; 11 — технологическая дорога; 12 — границы участков внутримассового горения отходов; 13 — внешняя граница объекта.

Элюатное биотестирование позволяет оценить токсичность проб грунтов и грунтовых вод, обусловленную наличием растворимых форм загрязняющих веществ, что значимо для объектов, имеющих водно-миграционный перенос. Определение токсичности проб для представителей зоопланктона осуществляли в ходе острого опыта путем биотестирования проб с использованием в качестве тест-организмов рачков большой дафнии [11]. Критерием острой токсичности пробы является гибель 50 % и более дафний в тестируемой пробе за 48 часов при условии, что в контрольном варианте гибель не превышает 10 %.

Другим достаточно распространенным тест-организмом элюатного биотестирования являются инфузории-туфельки в связи с тем, что их чувствительность к широкому кругу токсикантов весьма близка к чувствительности тканей человека и животных. Кроме того, инфузории широко распространены в пресных водоемах и принимают активное участие в круговороте веществ как консументы. Биотестирование было проведено инструментальным методом с применением прибора серии «Биотестер» для измерения параметров поведенческой реакции инфузорий, что делает этот метод определения достаточно быстрым и удобным [12].

Критерием токсичности в биотестировании на инфузориях служит индекс токсичности (Т) — безразмерная величина, принимающая значения от 0 до 1 в соответствии со степенью токсичности анализируемой пробы, где допустимая степень находится в пределах $0,00 < T < 0,40$; умеренная — в пределах $0,40 < T < 0,70$; высокая — при $T > 0,70$.

При помощи биотеста на микроводоросли хлорелла исследователями замечено, что токсичные эффекты можно обнаружить при концентрациях ниже предела чувствительности других тест-организмов [13]. Определение токсичности проб с использованием в качестве тест-культуры водоросли проводилось инструментальным методом с использованием фотоэлектроколориметра ИПС-03 для измерения оптической плотности суспензии водоросли по ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04/ Т 16.1:2:2:2:3:3.7-04 [14]. Критерием токсичности анализируемой воды является снижение на 20 % и более (подавление роста) или увеличение на 30 % и более (стимуляция роста) величины оптической плотности культуры водоросли, выращиваемой в течение 22 часов световой экспозиции на тестируемой воде, по сравнению с ее ростом на контрольной среде, приготовленной на дистиллированной воде.

Исследование фитотоксичности водного экстракта из отобранных проб было проведено по методике МР 2.1.7.2297-07 [15]. В качестве тест-организма в данном тесте применяются семена овса посевного. Элюат признается токсичным, если ингибирование роста корней семян происходит на 20 % и более от контроля. При пороге фитотоксичности менее 20 % негативное воздействие на среду обитания человека маловероятно.

Для адекватной оценки токсичности почвогрунтов и почв недостаточно использование элюатного метода фитотестирования, а необходимо применение контактного способа лабораторного фитотестирования, которое позволяет фиксировать уровень воздействия твердых загрязняющих веществ [16].

Контактное лабораторное фитотестирование проводилось по методике, разработанной в Санкт-Петербургском научно-исследовательском центре экологической безопасности РАН [17]. В качестве тест-культуры здесь используются семена пшеницы мягкой (*Triticum aestivum*). По данной методике диагностируется уровень токсичности загрязненных почвогрунтов в соответствии с разработанной шкалой степени токсичности по результатам унетения всхожести семян (N_1 , %) и унетению длины корней (N_2 , %) по сравнению с контрольной пробой на ранних стадиях их развития: V — практически не токсичные; IV — малотоксичные; III — умеренно токсичные; II — опасно токсичные; I — высоко опасно токсичные. Уровень токсичности оценивается согласно Постановлению МПР РФ № 536 от 04.12.2014 г. [18], который регламентирует применение биотест-систем для выявления токсичности отходов.

Все определения проводили в 4-кратной повторности. Для статистической обработки полученных данных использовали программу MS Excel и Statistica 10. Достоверность различий между средними значениями сравнивалась с помощью критерия Стьюдента в варианте группировки выборок с наименее значимой разницей (Least Significant Difference, LSD) при уровне значимости 5 % ($P < 0,05$). В таблицах приведены средние значения $\pm$ стандартные отклонения (табл. 1–6).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химические исследования показали, что водные вытяжки проб почвогрунтов имеют слабощелочную среду (рН 7,3–7,5) и не засолены (удельная электропроводность составляла 0,08–0,11 мСм/см). Водные вытяжки проб донных грунтов являлись нейтральными (рН 6,4) и незасоленными (удельная электропроводность составляла 0,27–0,28 мСм/см).

Таблица 1

**Результаты биотестирования проб
на ракообразных (большая дафния
(*Daphnia magna* Straus))**

Проба	Количество рачков		Токсикологи- ческая харак- теристика пробы
	выживших за время экспози- ции (среднее) ^а , 48 ч	погибших по отношению к контролю, А %	
Контроль ^б	9,0 ± 0,0	—	—
Проба № 1	5,5 ± 0,4	39	Не токсична
Проба № 2	3,0 ± 0,0	67	Токсична
Проба № 3	0,0 ± 0,0	100	Токсична
Проба № 4	8,5 ± 0,4	5	Не токсична

Примечание. Прочерк — не определяется.

^а Стандартная ошибка.

^б Контроль — культивационная вода.

^в А % — гибель >50 % дафний.

Таблица 2

**Результаты биотестирования проб
на инфузориях-туфельках
(*Paramecium caudatum*)**

Номер пробы	Средние показания прибора ^б	Среднее зна- чение индекса токсичности, Т	Степень токсичности ^в
Контроль ^а	105,0±10,2	—	—
1	29,0±1,91	0,78	III
2	53,0±2,48	0,59	II
3	101,0±5,81	0,21	I
4	84,0±6,04	0,37	I

^а Контроль — дистиллированная вода. Степень токсичности: I — допустимая, II — умеренная, III — высокая. Прочерк — не определяется.

^б Среднее значение четырех повторностей ± стандартная ошибка.

Таблица 3

**Результаты биотестирования проб на микроводоросли хлорелла
(*Chlorella vulgaris* Beijerinck)**

Проба	Среднее значение оптической плотности ^б	Отклонение от контроля, %	Наличие токсического действия пробы	Предел повторяемо- сти для четырех ре- зультатов параллель- ных измерений, %
Контроль ^а	0,201 ± 0,006	0	—	12
проба № 1 — почвогрунт	0,295 ± 0,007	+47	Оказывает	10
проба № 2 — почвогрунт	0,220 ± 0,009	+9	Не оказывает	18
проба № 3 — донный грунт	0,023 ± 0,001	—88	Оказывает	18
проба № 4 — донный грунт	0,240 ± 0,001	+19	Не оказывает	18
Контроль	0,301 ± 0,022	0	—	22
вода дренирующего канала	0,212 ± 0,008	—30	Оказывает	4

Примечание. Прочерк — не определяется.

^а Контроль — дистиллированная вода.

^б Стандартная ошибка.

Таблица 4

**Результаты фитотестирования водного экстракта из образцов на семенах овса посевного
(*Avena Sativa*)**

Номер образца	Средняя длина корней		Е _т , фитотоксический, %	t _d	S	Тест-реакция
	мм	% к контролю				
Контроль	27,24	—	0	—	0,02	Норма
1	27,38	100,5	0,5	1,13	0,40	»
2	22,85	83,8	16,1	2,65	1,39	»
3	26,04	95,5	3,7	1,43	0,90	»
4	26,63	97,8	2,2	3,25	1,51	»

Примечание. Контроль — чистая почва; t_d — коэффициент достоверности; S — ошибка среднего арифметического; фитотоксическое действие фиксируется при E_т > 20 %. Прочерк — не определяется.

Таблица 5

 Результаты контактного фитотестирования почвогрунтов на семенах высших растений
(тест-культура — пшеница мягкая (*Triticum vulgare*))

Номер образца	Всхожесть			Длина корня			Степень токсичности
	Среднее значение, %	N ₁ *	t _d **	мм	N ₂ *	t _d **	
Контроль	91,7 ± 2,0***	—	—	70,1 ± 2,0	—	—	—
1	86,7 ± 6,61	−5,5	0,99	61,9 ± 3,61	−11,7	1,31	V
2	93,3 ± 4,41	+8,4	0,71	52,4 ± 2,0	−25,2	3,03	IV

Примечание. Степень токсичности: V — практически не токсичные; IV — малотоксичные. Прочерк — не определяется.

* Показатель, характеризующий разницу с контролем в %.

** Коэффициент достоверности; t_{st} = 2,45.

*** Ошибка определения.

Таблица 6

Чувствительность биотестов к токсикантам в пробах

Тест-функция организма	Проба			
	Почвогрунт		Донный грунт	
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Смертность <i>Daphnia magna</i> St.	0	T	T	0
Изменение хемотаксиса <i>Paramecium caudatum</i>	Высокая токсичность	Умеренная токсичность	0	0
Изменение величины оптической плотности <i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck	T	0	T	0
Длина корней проростков <i>Avena Sativa</i>	0	0	0	0
Всхожесть и длина корня проростков <i>Triticum vulgare</i>	0	Малая токсичность	—	—

Примечание. T — токсичность обнаружена; 0 — токсичность не обнаружена; прочерк — не определялось.

Тяжелые металлы (ТМ) представляют собой традиционные токсиканты в объектах НЭВ. Результаты химического анализа четырех проб, свидетельствовали о низком содержании химических элементов. Исключение составило высокое содержание валовой формы никеля в пробе почвогрунта № 2 (350 мг/кг), что превышало утвержденное Минздравом значение ПДК (20 мг/кг для песчаных и супесчаных почв), а также повышенное содержание валового кадмия в пробе донного грунта № 3, которое составило 2,2 мг/кг (ПДК вал — 0,5 мг/кг) [19]. Показатели содержания меди, никеля, свинца не выходили за пределы утвержденных нормативов в почве. Органические токсиканты в период эксплуатации объекта имели относительно низкие концентрации в почвогрунтах: 3,4-бенз(а)пирен — 0,01 мг/кг (ПДК — 0,02 мг/кг), полихлорбифенилы — 0,03 мг/кг (ПДК — 0,06 мг/кг), хлорсодержащие пестициды — 0,02 мг/кг (ПДК — 0,1–0,5 мг/кг), нефтепродукты — 186 мг/кг (ПДК — 1000 мг/кг).

В табл. 1 представлены результаты проведенного биотестирования на ракообразных. Токсичность была выявлена в двух пробах: в одной пробе почвогрунта, отобранного в центральной части свалки (проба № 2), и в донном грунте (проба № 3).

Результаты биотестирования проб на тест-культуре инфузорий-туфельки приведены в табл. 2. На основе использования данного биотеста была выявлена токсичность в пробе почвогрунта № 1 (высокая степень) и в пробе № 2 (умеренная степень). Токсичность в донных грунтах на инфузориях не была выявлена.

Результаты биотеста проб с использованием качества тест-культуры микроводоросли хлорелла приведены в табл. 3. При биотестировании на культуре водоросли была обнаружена токсичность в почвогрунте № 1 и в пробе донного грунта № 3.

Итоги проведенных исследований элюатного биотестирования с использованием трех тест-культур позволяют заключить, что среди исследованных проб свалки в зоне экологического риска находится почвогрунт. В донном грунте токсичность выявляется местами.

Результаты фитотестирования на семенах овса посевного представлены в табл. 4. Они показали, что с эффект торможения (E_T) у всех образцов не превышает 20 %, что свидетельствует об отсутствии токсического действия всех образцов на данную тест-культуру.

Полученные результаты контактного фитотестирования образцов почвогрунтов представлены в табл. 5. С помощью него в почвогрунтах объекта «закрытая свалка» была выявлена малая степень токсичности в образце № 2.

Обобщенные результаты примененных в ходе экотоксикологических исследований биотестов представлены в табл. 6.

Как видно из приведенных данных, с помощью разных тест-организмов токсичность выявлялась в образцах почвогрунтов и донном грунте. Очевидно, что двух биотестов с разными тест-культурами недостаточно для проведения адекватной экотоксикологической характеристики компонентов объектов НЭВ. В почвогрунте № 1 токсичность была установлена с помощью элюатного метода на инфузориях и водоросли, а почвогрунте № 2 — на дафниях и водоросли, в донном грунте № 3 — на дафниях и хлорелле. С помощью контактного метода фитотестирования было зафиксирована токсичность в почвогрунте № 2. В образце донного грунта № 4 токсичность не была выявлена. Из методов фитотестирования метод контактного фитотестирования оказался чувствительным к поллютантам, присутствующих в почвогрунтах объекта НЭВ, что свидетельствует о необходимости включения данного метода в мониторинг подобных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование экологического состояния почвогрунтов и донных грунтов объекта НЭВ, который находится в бассейне Финского залива Балтийского моря, позволило с помощью методов биотестирования с использованием четырех тест-культур из разных систематических групп (дафнии, инфузории, водоросли, семена растений) наиболее точно выявить присутствие токсичных веществ в объекте. В ходе исследований установлено, что использование семян овса в качестве тест-культуры в элюатном методе не позволило обнаружить токсичность в исследованных образцах. Однако при контактном биотестировании с применением семян пшеницы был получен чувствительный отклик.

Использованные методы биотестирования продемонстрировали свою эффективность в обнаружении токсикантов на объекте НЭВ — закрытой санкционированной свалке. Для дальнейшей экотоксикологической оценки компонентов объектов НЭВ необходимо включать в блок биотест-систем как элюатные, так и контактные методы биотестирования. Также для точного определения токсичности компонентов объектов НЭВ следует применять биотесты с использованием тест-культур из различных систематических групп.

Таким образом, применение методов биотестирования при экологических исследованиях дает возможность наиболее точно оценить воздействие объекта НЭВ на окружающую среду и позволяет запланировать дополнительные меры по улучшению экологической ситуации на объектах НЭВ. По результатам исследования можно заключить, что из-за миграции загрязняющих веществ есть опасность их выноса в ближайшие водные объекты. Из этого следует вывод о необходимости разработки программы по осуществлению природоохранных мероприятий.

Работа выполнена в рамках гос. задания Министерства науки и высшего образования РФ (FFZF-2022-0014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постановление** Правительства РФ от 4 мая 2018 г. № 542 «Об утверждении Правил организации работ по ликвидации накопленного вреда окружающей среде» (с изменениями и дополнениями; Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации от 30.12.2021 № 446-ФЗ; ИТС_53_2022_Ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде. Приказ Росстандарта от 12 декабря 2022 г. № 311) [Электронный ресурс]. — <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805060009> (дата обращения 16.12.2023)
2. **Шмыков В.И., Немыкин А.Я., Корытный Л.М.** Эколого-географические исследования в речных бассейнах // География и природ. ресурсы. — 2019. — № 2. — С. 184.
3. **Гомбоев Б.О., Цыбикова А.Б., Ульзетуева И.Д., Жамьянов Д.И.-Д.** Оценка загрязненности водных ресурсов в бассейне р. Селенги на территории Монголии и России в результате антропогенного воздействия // География и природ. ресурсы. — 2020. — № 4. — С. 95–104. — DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(95-104)

4. Кулибаба В.В., Петухов В.В., Зинатулина Е.И., Меринова Е.С. Рекультивированные карьеры Приневской низменности — специфическая разновидность объектов накопленного экологического ущерба // Региональная экология. — 2016. — № 1 (43). — С. 108–114.
5. Капелькина Л.П., Бардина Т.В. Подходы к проведению исследований объектов накопленного экологического вреда // Биосфера. — 2023. — Т. 15, № 3. — С. 184–192.
6. Ашихмина Т.В., Каверина Н.В., Куприенко П.С. Анализ негативных экологических последствий эксплуатации полигона твердых коммунальных отходов г. Воронежа на разных этапах его жизненного цикла // Региональные геосистемы. — 2020. — № 44 (3). — С. 343–358. — DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-3-343-358
7. Alvarenga P., Palma P., de Varennes A., Cunha-Queda A.C. A contribution towards the risk assessment of soils from the Sao Domingos Mine (Portugal): Chemical, microbial and ecotoxicological indicators // Environ Pollut. — 2012. — P. 161:50–161:56.
8. Терехова В.А. Биотестирование экотоксичности почв при химическом загрязнении: современные подходы к интеграции для оценки экологического состояния (обзор) // Почвоведение. — 2022. — № 5. — С. 586–599.
9. Олькова А.С. Актуальные направления развития методологии биотестирования водных сред // Вода и экология: проблемы и решения. — 2018. — № 2 (74). — С. 40–50. — DOI: 10.23968/2305–3488.2018.20.2.40–50
10. Bardina T.V., Chugunova M.V., Kulibaba V.V., Polyak Y.M., Bardina V.I., Kapelkina L.P. Applying bioassay methods for ecological assessment of the soils from the brownfield sites // Water Air Soil Pollut. — 2017. — Vol. 228:351. — DOI: 10.1007/s11270-017-3521-3
11. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12-06 Т 16.1:2:2:2:3:3.9-06. Методика измерений количества *Daphnia magna* Straus для определения острой токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, донных отложений, отходов производства и потребления методом прямого счета. — Красноярск. — 2021 г. [Электронный ресурс]. — <https://meganorm.ru/Data2/1/4293767/4293767837.pdf> (дата обращения 06.12.2023)
12. ФР 1.39.2015.19243. Методика определения токсичности проб почв, донных отложений и осадков сточных вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер» [Электронный ресурс]. — <https://meganorm.ru/Data2/-1/4293758/4293758202.htm> (дата обращения 03.12.2023)
13. Nyholm N., Källqvist T. Methods for growth inhibition toxicity tests with freshwater algae // Environmental Toxicology and Chemistry. — 1989. — Vol. 8. — P. 689–703.
14. 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, донных отложений, осадков сточных вод, отходов производства и потребления [Электронный ресурс]. — <https://files.stroyinf.ru/-Index2/1/4293763/4293763986.htm> (дата обращения 04.12.2023)
15. МР 2.1.7.2297-07. Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности [Электронный ресурс]. — <https://docs.cntd.ru/document/1200061157> (дата обращения 21.11.2023)
16. Nicolaeva O., Tikhonov V., Vecherskii M., Kostina N., Fedoseeva E., Astaikina A. Ecotoxicological effects of traffic pollutants in roadside soils of Moscow // Ecotoxicology and Environmental Safete. — 2019. — Vol. 172. — P. 538–546.
17. ФР 1.39.2006.02264. Методика выполнения измерений всхожести семян и длины корней проростков высших растений для определения токсичности техногенно-загрязненных почв. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. науч.-исслед. центра экологич. безопасности РАН, 2009. — 19 с.
18. Приказ Минприроды России от 04.12.2014 г. № 536. «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду». [Электронный ресурс]. — https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_192145/ (дата обращения 16.12.2023)
19. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Электронный ресурс]. — https://www.rospotrebnadzor.ru/files/-news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf (дата обращения 16.12.2023)

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 10.10.2024

Принята к публикации 10.03.2025