
ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 504.06; 574.4

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ И ЕЕ АПРОБАЦИЯ В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

А. А. ВОЛЧЕК¹⁾, А. В. БЕЗРУЧКО²⁾

¹⁾Брестский государственный технический университет,
ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь

²⁾Брестский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды,
пл. Свободы, 11, 224030, г. Брест, Беларусь

Разработана методика комплексной оценки экологического состояния природно-техногенных геосистем в зонах влияния полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области. Данная методика апробирована на полигонах твердых коммунальных отходов (Барановичи, Брест, Береза, Кобрин, Лунинец, Пинск). Проведено ранжирование исследуемых полигонов по косвенным и прямым критериям, при помощи которых установлена минимальное и максимальное негативное воздействие обследованных полигонов на такие компоненты окружающей среды, как подземные воды и почвы. Проведенное ранжирование обследованных полигонов свидетельствует о том, что с течением времени каждый из них в разной степени влияет на компоненты окружающей среды (подземные воды, почву).

Образец цитирования:

Волчек АА, Безручко АВ. Методика комплексной оценки экологического состояния природно-техногенных геосистем и ее апробация в зонах влияния полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;2:88–97. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-88-97>

For citation:

Volchek AA, Biazruchka AB. The method of comprehensive assessment of the ecological state of natural and man-made geosystems and its approbation in the zones of influence of landfills of solid municipal waste in the Brest region. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:88–97. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-88-97>

Авторы:

Александр Александрович Волчек – доктор географических наук, профессор кафедры природообустройства.
Алена Витальевна Безручко – аспирант факультета инженерных систем и экологии; начальник отдела контроля за охраной и использованием атмосферного воздуха и водных ресурсов.

Authors:

Aleksandr A. Volchak, doctor of science (geography), professor at the department of environmental engineering.
volchak@tut.by
Alena V. Biazruchka, graduate student, faculty of engineering systems and ecology; head of the department of control over the protection and use of atmospheric air and water resources.
alena-bezruchko@yandex.by

По данным 2023 г., минимально негативное влияние по косвенным критериям, макро- и микрокомпонентному составу и органическим соединениям в подземных водах оказывает полигон г. Береза. Наименьшее загрязнение почв установлено на полигонах ТКО Пинск, Барановичи. Самая неблагоприятная обстановка с загрязнением почв обстоит вблизи полигона Лунинец.

Ключевые слова: полигон твердых коммунальных отходов; подземные воды; почвы; методика; комплексная оценка; макрокомпоненты; микроэлементы.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках работы БРФФИ–Брест-2022 (проект X22B-010, № ГР 20220931). Авторы выражают благодарность сотрудникам ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси» и директору Николаю Васильевичу Михальчуку за оказанную помощь в проведении исследований.

THE METHOD OF COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF NATURAL AND MAN-MADE GEOSYSTEMS AND ITS APPROBATION IN THE ZONES OF INFLUENCE OF LANDFILLS OF SOLID MUNICIPAL WASTE IN THE BREST REGION

A. A. VOLCHEK^a, A. B. BIAZRUCHKA^b

^a*Brest State Technical University,
267 Maskoŭskaja Street, Brest 224017, Belarus*

^b*Brest Regional Committee of Natural Resources and Environmental Protection,
11 Svobody Square, Brest 224030, Belarus*

Corresponding author: A. B. Biazruchka (alena-bezruchko@yandex.by)

A methodology has been developed for the «Comprehensive assessment of the ecological state of natural and man-made geosystems in the zones of influence of landfills of solid municipal waste in the Brest region». This technique has been tested at landfills of municipal solid waste (hereinafter referred to as MSW) in Baranovichi, Brest, Bereza, Kobrin, Luninets, Pinsk. The MSW landfills under study were ranked according to indirect and direct criteria, with the help of which the minimum and maximum negative impact of the examined MSW landfills on environmental components such as groundwater and soils was established. The ranking of the surveyed polygons shows that over time, each polygon affects environmental components (groundwater, soil, vegetation) to one degree or another. According to data for 2023, the solid waste landfill in Birch has minimal negative impact on indirect criteria, macro- and micro-component composition and organic compounds in groundwater. The least soil pollution was found at landfills in Pinsk and Baranovichi. The most unfavorable situation with soil pollution has developed near the Luninetskaya landfill.

Keywords: landfill of solid household waste; groundwater; soils; methodology; comprehensive assessment; macro components; trace elements.

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the BRFFI–Brest-2022 (project X22B-010, no. GR 20220931). The authors are grateful to the National Research University «Polesky Agrarian and Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus» and personally to Director Nikolai Vasilyevich Mihalchuk for their assistance in conducting research.

Введение

В современном мире при стремительном развитии цивилизации назрела проблема утилизации образующихся отходов. В настоящее время основным и затратным путем утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является их захоронение на специально отведенных и оборудованных полигонах.

Объект захоронения отходов – полигон, иное капитальное строение (здание, сооружение), предназначенные для захоронения отходов¹.

Отходы, захораниваемые на полигонах, разнородны по составу, классам опасности, физико-химическим и биохимическим свойствам. Под воздействием атмосферы, воды, грунтов, взаимодействуя друг с другом, они претерпевают сложные изменения. Основные процессы, протекающие в теле полигона, – это физические, химические и биохимические, которые накладываются друг на друга, усиливаются, подавляются, видоизменяются [2].

¹Об обращении с отходами: Закон Республики Беларусь, 20 июля 2007 г., № 271-З // Нац. правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 05.01.2024, 2/3052.

Так, согласно [3], способ захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах ТКО является наиболее распространенным, а в современных условиях Беларуси с учетом экономических и экологических реалий – наиболее оптимальным. В Республике Беларусь в 2018 г. на таких полигонах было размещено около 3,1 млн т, а также 0,8 млн т отходов производства, не относящихся к коммунальным. При этом 94 % ТКО было захоронено на 159 полигонах.

Для сравнения, в России практически весь объем образующихся ТКО (96 %) захоранивается на полигонах, санкционированных и нелегальных свалках².

В настоящее время на территории Брестской области имеется 27 полигонов ТКО, на которых размещаются отходы потребления и некоторые виды отходов производств. Все полигоны находятся на балансе службы жилищно-коммунального хозяйства и относятся к сооружениям средней мощности [5]. На территории области полигонов большой мощности³ нет. Все полигоны зарегистрированы как объекты захоронения в РУП «Бел НИЦ «Экология» [6].

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что на сегодняшний день общепринятая и утвержденная методика оценки геоэкологических рисков от полигонов ТКО отсутствует. Сложностью разработки методов количественной оценки является невозможность учета всего комплекса негативного воздействия полигонов ТКО; оценки, как правило, ограничиваются только выяснением их влияния на грунтовые воды и почвы.

Для оценки геоэкологических рисков от исследуемых полигонов ТКО И. В. Черновой (2019) использована методика РУП «БелНИЦ «Экология», которая учитывает совокупность прямых (суммарные индексы загрязнения грунтовых вод и почв) и косвенных (объем накопившихся отходов и долю экологически опасных отходов, размещаемых на полигонах ТКО) показателей. Данная методика позволяет осуществлять учет оценки рисков от загрязнения нескольких компонентов (грунтовых вод и почв). Она ориентирована на санитарно-гигиенические нормативы качества окружающей среды, утвержденные постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 25.01.2001 № 37. Данные нормы едины на всей территории республики. Однако методика не учитывает специфику фоновых показателей территорий, на которых расположены объекты захоронения.

Цель исследования: усовершенствовать методику РУП «БелНИЦ «Экология» для оценки геоэкологических рисков от полигонов ТКО с использованием прямых и косвенных критериев оценки их воздействия на окружающую среду, с учетом фоновых показателей для каждого объекта отдельно. Расширить спектр используемых данных показателями уровней загрязнения почв в импактных зонах полигонов ТКО.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследований выступали полигоны ТКО городов Барановичи, Брест, Береза, Кобрин, Лунинец, Пинск, подземные воды, почвы в пределах санитарно-защитных зон полигонов.

Методы исследований: ландшафтно-геохимический (ландшафтно-геохимическая и гидрохимическая съемка), химико-аналитический (титриметрический, гравиметрический, бихроматный, флуориметрический, потенциометрический, фотометрический методы), метод атомно-абсорбционной спектроскопии, статистический и сравнительный анализ.

Химико-аналитические исследования проб проводились по стандартным методикам измерений, допущенных к применению в деятельности лабораторий экологического контроля предприятий и организаций Республики Беларусь, в Полесском аграрно-экологическом институте НАН Беларуси, который располагает всем необходимым оборудованием для качественного выполнения исследований в условиях, аккредитованных на соответствие требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 (ISO/IEC 17025:2017, IDT), лабораторий (регистрационный номер аттестата аккредитации: ВУ/112 1.1832 от 04.11.2022 г.; срок действия аттестата аккредитации: 04.11.2022–04.11.2027 гг.).

Состояние подземных вод оценивали путем сравнения полученных данных с фоновыми показателями для подземных безнапорных вод.

Гидрохимическая оценка подземных вод и почв в зонах влияния полигонов ТКО осуществлялась по макрокомпонентному составу (концентрация сульфат-, хлорид-, аммоний-, фосфат-ионов, а также железа и ХПК) и микроэлементам (концентрация свинца, цинка, марганца, никеля).

²ТКП 17.11-02-2009 (02120/02030). Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Обращение с коммунальными отходами. Объекты захоронения твердых коммунальных отходов. Правила проектирования и эксплуатации = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Адыходы. Абыходжанне з камунальнымі адыходамі. Аб'екты захавання цвёрдых камунальных адыходаў. Правілы праектавання і эксплуатавання. Введ. 25.04.2009 г. Минск : Минприроды, 2014. 29 с.

³ТКП 17.11-02-2024 (33040/33140). Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Эксплуатация объектов захоронения коммунальных отходов = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Адыходы. Эксплуатацыя аб'ектаў захавання камунальных адыходаў. Правілы праектавання і эксплуатавання. Введ. 01.05.2024 г. Минск : Минприроды, 2024. 21 с.

Исследования проб подземных вод выполнялись по следующим методикам: массовая концентрация нефти и нефтепродуктов (ПНД Ф 14:1:2:4.128-9), массовая концентрация железа общего (СТБ 17.13.05-45-2016), массовая концентрация нитритов (ГОСТ 33045-2014 п. 6, метод Б), массовая концентрация нитратов (ГОСТ 33045-2014 п. 9, метод Д), массовая концентрация аммиака и ионов аммония (ГОСТ 33045-2014 п. 5, метод А), массовая концентрация хлоридов (СТБ 17.13.05-42-2015), концентрация ортофосфата и тяжелых металлов (далее – ТМ) (ГОСТ 18309–2014, п. 6).

Определение содержания хлоридов в водах осуществлялось титриметрическим методом; нефти и нефтепродуктов – флуориметрическим методом; ХПК – бихроматным методом; азота нитритного, нитратного, аммонийного, железа общего и фосфора фосфатного – фотометрическим методом на спектрофотометре СФ-56А (заводской номер ХЕ0003). Определение содержания в водах ТМ (свинца, кадмия, цинка, меди, никеля, хрома, железа, кобальта и марганца) выполняли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре с пламенным атомизатором SOLAAR M6 MkII, производитель ThermoElectron Corporation (заводской номер 135121).

Образцы для исследования (почв и подземных вод) отобраны с одинаковых трансект вблизи каждого объекта захоронения ТКО. Пробы подземных вод отбирались из наблюдательных скважин после 5-минутной прокачки. В случае мало дебетных скважин производилась полная откачка из них воды, с дальнейшим ожиданием наполнения ее до уровня, позволяющего сделать отбор образца.

Почвы вблизи полигонов ТКО дерново-подзолистые песчаные с типовым для Белорусского Полесья профилем. Исследования проб почвенного покрова в зонах влияния полигонов ТКО выполнялись по следующим показателям: pH_{KCl} (ГОСТ 26583-85), валового содержания ТМ (СТБ ИСО 110472006).

Пробы почвы отбирались с 1–10-сантиметрового слоя. Отборы проб проводились методом конверта в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 «Почвы. Общие требования к отбору проб», ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Методы отбора проб химического, бактериологического, гельминтологического анализа», а также ТКП 17.03-02-2020 (33140) «Правила и порядок определения загрязнения земель (включая почвы) химическими веществами». Объединенная проба весом не менее 1 кг формировалась после смешивания 5 образцов, сыпалась в полиэтиленовую тару, маркировалась и регистрировалась. Исследования проводились на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связной плазмой iCAP 7200 в соответствии с ГОСТ ISO 22036-2014 «Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы».

Все пробы с указанных объектов отбирались и анализировались в трехкратной повторности. В работе приведено их среднее значение.

Разработанная методика апробирована на данных, полученных при анализе состава образцов почв и подземных вод за 2022–2023 гг., в рамках выполнения работы БРФФИ–Брест-2022 (проект Х22Б-010, № ГР 20220931), полученных в окрестностях полигона ТКО г. Бреста.

Результаты исследования и их обсуждение

Косвенные (побочные) критерии представляют собой совокупность эксплуатационных параметров полигонов (длительность эксплуатации, занятая отходами площадь, мощность, доля экологоопасных отходов) и оснащенности средозащитной инфраструктурой (наличие и состояние наблюдательных скважин, ограждения и обваловки, водоотводных канав и обводных каналов, системы перехвата легколетучих отходов ТКО с поверхности тела полигона, контрольного колодца уровня фильтрата, противифильтрационного экрана и системы сбора фильтрата).

Расчет косвенных (побочных) показателей осуществлялся по балльной системе по предложенной формуле:

$$N_{\text{косв}} = \Sigma N_{\text{тех}} + \Sigma N_{\text{инфр}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{косв}}$ – сумма баллов, определенная на основе учета косвенных показателей состояния полигонов ТКО; $\Sigma N_{\text{тех}}$ – совокупность эксплуатационных показателей полигонов (длительность эксплуатации, занятая отходами площадь, мощность, доля экологоопасных отходов); $\Sigma N_{\text{инфр}}$ – совокупность показателей оснащенности полигонов ТКО средозащитной инфраструктурой (наличие наблюдательных скважин, ограждения и обваловки, водоотводных канав и обводных каналов, контрольного колодца уровня фильтрата, противифильтрационного экрана и системы сбора фильтрата).

Эксплуатационные показатели полигонов ТКО Брестской обл. Нормативные документы 1980-х гг. допускали строительство полигонов со сроком эксплуатации до 10 лет [3]. Согласно действующему в Беларуси документу [4], средний расчетный срок эксплуатации полигона принимается в настоящее время за 15–20 лет.

Эксплуатационные показатели исследуемых полигонов ТКО (длительность эксплуатации, занятая отходами площадь, мощность, доля экологоопасных отходов) оценивалась по балльной системе от 3 до 0.

В этой связи по длительности эксплуатации полигоны ТКО можно подразделить на 4 группы: со сроком эксплуатации более 60 лет (нет таких полигонов ТКО, 3 балла), 40–60 лет (полигон ТКО гг. Кобрин, Пинск, 2 балла), 20–40 лет (полигоны ТКО гг. Лунинец, Брест, Барановичи, 1 балл), менее 20 лет (полигон ТКО г. Береза, 0 баллов). Среди обследованных самый «старый» полигон ТКО г. Кобрин функционирует около 54 лет, а самый «молодой» – около 5-и лет г. Береза (д. Речица).

По площади, занятой отходами, полигоны ТКО Брестской обл. можно также ранжировать на 4 группы: очень крупные (более 15 га (нет таких полигонов ТКО, 3 балла), крупные с занятой под отходами площадью от 10 до 15 га (полигоны ТКО гг. Бреста, Барановичи, 2 балла), средние – от 5 до 10 га (полигоны ТКО, гг. Пинск, Кобрин, Лунинец, 1 балл) и мелкие – менее 5 га (полигон ТКО г. Береза, 0 баллов).

По мощности (количество отходов, т/год) полигоны ТКО Брестской обл. также дифференцируются на 4 группы: полигоны, на которые поступает более 90 тыс. т отходов в год (полигон ТКО г. Бреста, 3 балла), от 60 до 90 тыс. т (таких полигонов нет, 2 балла), от 30 до 60 тыс. т (полигоны ТКО гг. Пинск, Барановичи, 1 балл) и менее 30 тыс. т (полигоны ТКО гг. Кобрин, Береза, Лунинец, 0 баллов). Из проанализированных данных следует, что на большинство обследованных полигонов области попадает менее 30 тыс. т отходов в год; при этом наибольшее количество отходов поступает на полигон ТКО г. Бреста (91,7 тыс. т/год).

По удельному весу захораниваемых экологоопасных отходов на территории области можно выделить также 4 группы: полигоны, на которых захоранивается более 7,5 % экологоопасных отходов (полигоны ТКО гг. Брест, Лунинец, 3 балла), от 5 до 7,5 % (полигон ТКО г. Барановичи – 2 балла), от 2,5 до 5 % (полигоны ТКО гг. Пинск, Береза, 1 балл) и менее 2,5 % (полигон ТКО г. Кобрин, 0 баллов). Количество (доля) образующихся экологоопасных отходов на территориях административных районов зависит от характера функционирующих производств (аграрного или промышленного).

На обследованных полигонах области захоранивается менее 5 % экологоопасных отходов, что отражает преимущественно аграрную специализацию соответствующих административных районов. Полигоны ТКО с большей долей экологоопасных отходов приурочены к районам с крупными промышленными производствами.

Оснащенность полигонов ТКО Брестской обл. средозащитной инфраструктурой. По оснащенности полигонов ТКО Брестской обл. средозащитной инфраструктурой балльную оценку (0–3 балла) осуществляли по следующим критериям: наличие доступных для отбора грунтовых вод скважин, ограждения по периметру, водоотводных канав и обводных каналов, противофильтрационного экрана (далее – ПФЭ), контрольного колодца уровня фильтрата и системы сбора фильтрата.

По наличию доступных для отбора скважин обследованные полигоны подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых скважины отсутствуют (таких полигонов нет, 3 балла); полигоны, на которых обустроено от 1 до 5 скважин (полигоны ТКО гг. Кобрин, Пинск, Береза, Лунинец, 2 балла); полигоны, на которых обустроено от 6 до 11 скважин (полигон ТКО г. Барановичи, 1 балл) и полигоны, на которых обустроено более 11 скважин (полигон ТКО г. Брест, 0 баллов).

По наличию ограждения по периметру обследованные полигоны подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых ограждение отсутствует (таких полигонов нет, 3 балла); полигоны, на которых ограждение обустроено частично (таких полигонов нет, 2 балла); полигоны, на которых ограждение обустроено по всему периметру с изъянами (полигоны ТКО гг. Брест, Кобрин, Лунинец, Береза, 1 балл) и полигоны, на которых ограждение обустроено по всему периметру без изъянов (полигоны ТКО гг. Барановичи, Пинск, 0 баллов).

По наличию водоотводных канав и обводных каналов полигоны ТКО области подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых канавы и каналы отсутствуют (полигоны ТКО гг. Кобрин, Лунинец, 3 балла); полигоны, на которых канавы и каналы обустроены частично (полигоны ТКО гг. Барановичи, Брест, Пинск, Береза, 2 балла); полигоны, на которых канавы и каналы обустроены по всему периметру с изъянами (таких полигонов нет, 1 балл) и полигоны, на которых ограждение обустроено по всему периметру без изъянов (таких полигонов нет, 0 баллов).

По наличию контрольного колодца уровня фильтрата полигоны ТКО области также подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых контрольный колодец уровня фильтрата отсутствует (полигоны ТКО гг. Кобрин, Пинск, 3 балла); полигоны, на которых контрольный колодец уровня фильтрата обустроен, но захламлен отходами и не используется для контроля (полигон ТКО г. Лунинец, 2 балла); полигоны, на которых контрольный колодец уровня фильтрата обустроен, но не используется для контроля (таких полигонов нет, 1 балл) и полигоны, на которых контрольный колодец уровня фильтрата обустроен, содержится в порядке и используется для контроля (полигоны ТКО гг. Брест, Береза, Барановичи, 0 баллов).

По наличию ПФЭ полигоны ТКО области подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых ПФЭ отсутствует (полигон ТКО г. Кобрин, 3 балла); полигоны, на которых обустроен глиняный ПФЭ, или в основании полигона представлены глинистые грунты

природного генезиса (таких полигонов нет, 2 балла); полигоны, на которых обустроен ПФЭ с использованием искусственного материала (таких полигонов нет, 1 балл) и полигоны, на которых ПФЭ обустроен с использованием нескольких эффективных изолирующих материалов с размещением на предварительно созданный глиняный замок или глинистые пласты природного генезиса (полигоны ТКО гг. Барановичи, Береза, Пинск, Брест, Лунинец, 0 баллов).

По наличию системы сбора фильтрата полигоны ТКО области подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых система сбора фильтрата отсутствует (полигон ТКО г. Кобрин, 3 балла); полигоны, на которых обустроена система сбора фильтрата без откачки на эксплуатируемые карты и без его вывоза на очистные сооружения (таких полигонов нет, 2 балла); полигоны, на которых обустроена система сбора фильтрата с его подъемом (откачкой) на эксплуатируемые карты (полигоны ТКО гг. Барановичи, Брест, Береза, Лунинец, Пинск, 1 балл) и полигоны, на которых обустроена система сбора фильтрата с вывозом его на очистные сооружения (таких полигонов нет, 0 баллов).

Нами предложена шкала ранжирования полигонов ТКО Брестской обл. по косвенным показателям, включающая четыре оценочные категории экологической опасности (табл. 1): экологическую норму с суммой баллов по десяти косвенным критериям менее 5; экологический риск с количеством баллов от 6 до 10, экологический кризис – от 11 до 15 и экологическое бедствие – свыше 16 баллов.

Таблица 1

Шкала ранжирования полигонов ТКО по косвенным показателям

Table 1

Scale of ranking of MSW polygons by indirect indicators

Количество баллов	Категория экологической опасности	Полигон и сумма баллов
Менее 5	Экологическая норма	–
6–10	Экологический риск	Береза (7), Барановичи (10)
11–15	Экологический кризис	Пинск (13), Брест (13), Лунинец (14)
Более 16	Экологическое бедствие	Кобрин (18)

Такая градация обследованных полигонов ТКО Брестской обл. в соответствии с разработанной нами шкалой показала, что по косвенным критериям ни один полигон ТКО не попал в зону экологической нормы. К категории «экологический риск» отнесены два полигона: полигон ТКО г. Береза с суммой баллов 7 и полигон ТКО г. Барановичи с суммой баллов 10. Категорией «экологического кризиса» характеризуются полигоны ТКО гг. Бреста и Пинска с суммой баллов, равной 13, а также полигон ТКО г. Лунина, сумма баллов которого составляет 14. Самая высокая категория экологической опасности по косвенным критериям характерна для полигона ТКО г. Кобрин с 18 баллами.

Таким образом, ранжирование обследованных полигонов ТКО Брестской обл. по косвенным критериям в порядке увеличения нагрузки на окружающую среду выглядит следующим образом:

$$\frac{\text{Береза}}{7} \ll \frac{\text{Барановичи}}{10} \ll \frac{\text{Брест, Пинск, Лунинец}}{13} < \frac{\text{Кобрин}}{18}$$

С помощью прямых критериев осуществляют количественную оценку воздействия полигонов на компоненты природной среды, которая в данной работе включает суммарные индексы загрязнения подземных вод и почв относительно фоновых показателей.

Для оценки воздействия полигонов ТКО на подземные воды и почвы использовали геоэкологический показатель – индекс загрязнения (IZ), представляющий собой отношение концентрации загрязняющих веществ к их фоновым показателям в местах отбора.

Комплекс и количество загрязняющих веществ оценивались с использованием суммарного индекса загрязнения (SIZ), представляющего сумму отношений концентрации загрязняющих веществ к их фоновым показателям:

$$SIZ = C_1/\text{фон}_1 + C_2/\text{фон}_2 + \dots + C_n/\text{фон}_n, \quad (1)$$

где C – средняя концентрация загрязнителя (мг/дм³ для вод, мг/кг для почв); фон_n – значение фонового показателя для данного вещества (мг/дм³ для вод, мг/кг для почв).

Расчет суммарного индекса загрязнения подземных вод (*SIZ*_{ГВ}) осуществлялся по макрокомпонентам (*SIZ*_{МК}), микроэлементам (*SIZ*_{МЭ}) и органическим веществам (*SIZ*_{ОРС}) в соответствии с формулой:

$$SIZ_{ГВ} = SIZ_{МК} + SIZ_{ОРС} + SIZ_{МЭ}. \tag{2}$$

Среди макрокомпонентов учитывались концентрации сульфат-, хлорид-, аммоний-, фосфат-ионов, а также железа и химическое потребление кислорода (далее – ХПК); среди органических соединений – анионные поверхностно-активные вещества (далее – АПАВ) и нефтепродукты (далее – НП); среди микроэлементов – концентрации свинца, цинка, марганца, никеля (табл. 2). Оценка состояния подземных вод осуществлялась отдельно по каждой из трех групп показателей. Суммарные индексы их загрязнения вод (*SIZ*_{ГВ}) отражены в табл. 2.

Наиболее негативное влияние на подземные воды на основании анализа макрокомпонентного состава установлено для полигона ТКО г. Бреста, для которого суммарный индекс загрязнения составил 889,5. Среди макрокомпонентов наибольшие превышения значений фоновых показателей отмечены для аммоний-ионов. Ряд приоритетности загрязнения грунтовых вод в зонах воздействия полигонов ТКО макрокомпонентами имеет следующий вид:

$$\frac{\text{Береза}}{53,3} < \frac{\text{Барановичи}}{56,0} < \frac{\text{Лунинец}}{85,2} < \frac{\text{Пинск}}{110,7} < \frac{\text{Кобрин}}{125,1} < \frac{\text{Брест}}{889,5}$$

Таблица 2

Суммарные индексы загрязнения грунтовых вод в зонах воздействия полигонов ТКО Брестской обл.

Table 2

Total indices of groundwater pollution in the impact zones of landfills of the Brest region

Название исследуемого объекта захоронения/показатель, мг/дм ³		<i>SIZ</i> _{МК}	<i>SIZ</i> _{ОРС}	<i>SIZ</i> _{МЭ}	<i>SIZ</i> _{ГВ}	Среднее значение
Лунинец	С ¹	555,9	0,384	0,809	557,106	555,9
	С/фон ²	85,2	5,0	18,8	111,0	85,2
Барановичи	С	569,608	0,262	0,657	570,527	569,608
	С/фон	56,0	7,8	25,4	112,7	56,0
Пинск	С	738,9	0,258	0,652	739,828	738,9
	С/фон	110,7	5,7	27,9	144,4	110,7
Кобрин	С	396,4	3,596	0,576	400,611	396,4
	С/фон	125,1	24,1	3,2	155,6	125,1
Береза	С	231,4	0,109	2,423	233,97	231,4
	С/фон	53,3	1,2	146,1	212,8	53,3
Брест	С	1418,5	1,038	0,731	1420,3	1418,5
	С/фон	889,5	37,8	7,8	975,7	889,5

¹ – Средняя концентрация загрязнителя в водах, мг/дм³;

² – превышение местного гидрохимического фонового показателя, мг/дм³.

Анализ содержания в подземных водах органических соединений свидетельствует о напряженной ситуации в зоне воздействия полигона ТКО г. Бреста – превышение фонового показателя составляет 37,8 раз. Наиболее благоприятная ситуация с незначительными суммарными индексами загрязнения установлена для полигона ТКО г. Береза. Ряд приоритетности загрязнения грунтовых вод в зонах воздействия полигонов ТКО органическими соединениями имеет следующий вид:

$$\frac{\text{Береза}}{1,2} < \frac{\text{Лунинец}}{5,0} < \frac{\text{Пинск}}{5,7} < \frac{\text{Барановичи}}{7,8} < \frac{\text{Кобрин}}{24,1} < \frac{\text{Брест}}{37,8}$$

Таким образом, установлено, что максимальное загрязнение подземных вод макрокомпонентами и органическими соединениями характерно для полигона ТКО г. Бреста, наименьшее – для импактной зоны полигона ТКО г. Березы.

По микроэлементному составу наиболее сильным отрицательным воздействием на окружающую среду характеризуется полигон ТКО г. Березы ($SIZ_{мэ} = 146,1$), наименее негативным – полигон ТКО г. Кобрин ($SIZ_{мэ} = 3,2$). Ряд загрязнения грунтовых вод в зонах воздействия полигонов ТКО микроэлементами имеет следующий вид:

$$\frac{\text{Кобрин}}{3,2} < \frac{\text{Брест}}{7,8} < \frac{\text{Лунинец}}{18,8} < \frac{\text{Барановичи}}{25,4} < \frac{\text{Пинск}}{27,9} < \frac{\text{Береза}}{146,1}$$

Воздействие полигона ТКО на почвы, как показали исследования, зависит от срока его эксплуатации, ландшафтно-геологической приуроченности, соблюдения гигиенических и технологических условий эксплуатации.

В сравнении с кларками для почв мира, по А. П. Виноградову [7], а также региональными кларками для дерново-подзолистых почв Беларуси [8–10], почвы-аналоги юго-запада Беларуси обеднены большинством микроэлементов, в особенности активно мигрирующими в условиях кислой среды. На основании этого расчет суммарного индекса загрязнения почв ($SIZ_{п}$) осуществлялся по микроэлементам ($SIZ_{мэ}$). Для оценки воздействия полигонов ТКО на почвы использован геоэкологический показатель – индекс загрязнения (IZ), представляющий собой отношение концентрации загрязняющих веществ к их фоновым показателям.

Фоновые показатели для почв зон воздействия принимались отдельно для группы исследуемых полигонов ТКО гг. Бреста, Березы, Пинска, Лунинца, Кобрин и отдельно для полигона ТКО г. Барановичи, что отражено в табл. 3.

Таблица 3

Суммарные индексы загрязнения почв в зонах воздействия полигонов ТКО Брестской обл.

Table 3

Total indices of soil pollution in the zones of impact of landfills of the Brest region

Полигон / показатель		<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>	$SIZ_{п}$	Среднее значение
Пинск	C^1	3,49	0,04	1,64	9,69	79,15	1,04	0,52	3,44		
	$C/\text{фон}^2$	0,65	0,44	1,27	1,30	0,72	1,58	1,16	1,835	8,9	1,1
Барановичи	C	8,11	0,04	3,43	16,44	186,2	4,81	2,08	11,45		
	$C/\text{фон}$	0,87	1,33	1,51 ⁵	1,02	1,01	1,08	1,11	0,97	8,9	1,1
Брест	C	9,12	0,03	1,10	8,58	40,63	1,40	0,49	3,76		
	$C/\text{фон}$	1,69	0,34	0,85	1,15	0,37	2,125	1,09	2,00	9,6	1,2
Кобрин	C	5,84	0,11	1,90	10,41	24,84	1,47	0,53	3,59		
	$C/\text{фон}$	1,08	1,25	1,47	1,40	0,23	2,235	1,17	1,91	10,7	1,3
Береза	C	2,31	0,00	1,06	9,57	21,61	2,12	0,88	8,71		
	$C/\text{фон}$	0,43	0,00	0,82	1,29	0,20	3,21	1,96	4,635	12,5	1,6
Лунинец	C	7,47	0,04	1,96	19,37	81,86	2,45	0,83	5,00		
	$C/\text{фон}$	1,39	0,44	1,52	2,61	0,75	3,715	1,83	2,66	14,9	1,9
СФ-1 ³	–	5,39	0,09	1,29	7,43	109,6	0,66	0,45	1,88	–	–
СФ-2 ⁴	–	9,29	0,03	2,28	7,43	184,7	4,47	1,87	11,85	–	–

¹ – Средняя концентрация загрязнителя в почве, мг/кг; ² – превышение по отношению к фоновому показателю, раз; ³ – фоновый показатель для полигонов ТКО гг. Брест, Береза, Пинск, Лунинец, Кобрин; ⁴ – фоновый показатель для полигонов ТКО г. Барановичи; ⁵ – максимальные значения превышения фоновых показателей для каждого полигона.

Анализ полученных данных свидетельствует, что содержание в почвах микроэлементов по отношению к фоновому показателю наибольшее в зоне воздействия полигона ТКО г. Лунина (SIZп = 14,9), наименьшее – полигона ТКО гг. Пинска и Барановичи (SIZп = 8,9).

Ряд приоритетности загрязнения почв в зонах воздействия полигонов ТКО микроэлементами имеет следующий вид:

<u>Пинск, Барановичи</u>	<	<u>Брест</u>	<	<u>Кобрин</u>	<	<u>Береза</u>	<	<u>Лунина</u>
8,9		9,6		10,7		12,5		14,9

Геохимическое состояние почвенного покрова в зонах влияния исследуемых полигонов ТКО в целом не вызывает опасений. Вместе с тем сравнительный анализ содержания микроэлементов (табл. 3) с выделением максимальных превышений фоновых показателей для каждого полигона свидетельствует об установлении наиболее приоритетных загрязнителей в отношении обследованных полигонов – никеля и хрома, характеризующихся первым классом опасности. Так, ранжирование полигонов ТКО по содержанию никеля выглядит следующим образом:

<u>Пинск</u>	<	<u>Брест</u>	<	<u>Кобрин</u>	<	<u>Береза</u>	<	<u>Лунина</u>
1,58		2,12		2,23		3,21		3,71

Ранжирование полигонов ТКО на наличие хрома представлено следующей последовательностью:

<u>Пинск</u>	<	<u>Кобрин</u>	<	<u>Брест</u>	<	<u>Лунина</u>	<	<u>Береза</u>
1,83		1,91		2,0		2,66		4,63

Заметное накопление данных элементов в слое почвы 2–10 см свидетельствует о преимущественно аэрогенном поступлении элементов в экосистему. Для почв зон влияния обследованных полигонов характерна никель-хромовая специализация.

Заключение

В результате анализа косвенных критериев установлено, что ни один из исследованных полигонов ТКО не попал в зону «Экологической нормы». К категории «Экологический риск» отнесены полигон ТКО г. Береза и полигон ТКО г. Барановичи. Категорией «Экологический кризис» характеризуются полигоны ТКО гг. Бреста, Пинска и полигон ТКО г. Лунина. Самая высокая категория экологической опасности (по косвенным критериям) характерна для полигона ТКО г. Кобрин.

При анализе прямых критериев установлено, что минимальное негативное влияние на подземные воды по содержанию макрокомпонентов и органических соединений оказывает полигон ТКО г. Береза, максимальное – полигон ТКО г. Бреста. Напротив, по степени микроэлементного загрязнения подземных вод весьма контрастная гидрохимическая аномалия наблюдается в локации полигона ТКО г. Береза. Наиболее благоприятная ситуация отмечена в зоне влияния полигона ТКО г. Кобрин, однако она может быть связана с недостатком наблюдательных скважин на границе полигона, что вынуждает использовать для сравнительных оценок данные скважин, удаленных на 80–100 м от периферии полигона, что вступает в противоречие с требованиями п. 5.6.12 ТКП 17.11-02–2009 (02120/02030).

Максимальное загрязнение почв характерно для импактных зон полигонов ТКО гг. Лунина и Береза, минимальное – в почвах зон влияния полигонов ТКО гг. Пинск и Барановичи. В целом, для почв импактных зон обследованных полигонов характерна никель-хромовая специализация.

В прогнозном аспекте можно предположить, что максимальная интегральная эмиссия загрязняющих веществ характерна для полигонов в стадии их жизненного цикла около 30-и лет (полигоны ТКО гг. Бреста, Барановичей, Лунина); к 50-и годам жизненного цикла наблюдается тенденция к сокращению эмиссий и стабилизации экологического состояния прилегающих территорий (полигоны ТКО гг. Кобрин, Пинск). Наиболее острые эколого-геохимические ситуации могут развиваться при поступлении на захоронение опасных веществ на восходящей стадии эксплуатации полигонов или их отдельных карт (первые 10 лет) вследствие короткого цикла трансформации загрязнителей в рабочем теле полигона малой мощности – полигон ТКО г. Береза. Таким образом, ранжирование обследованных полигонов ТКО по косвенным и прямым критериям свидетельствует о том, что с течением времени каждый из них в разной степени влияет на компоненты окружающей среды.

Библиографические ссылки

1. Лысухо НА, Ерошина ДМ. *Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду. Монография.* Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова; 2011. 210 с.
2. Ерошина ДМ, Ходин ВВ, Зубрицкий ВС, Демидов АЛ. *Экологические аспекты захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах. Монография.* Минск : БелНИЦ «Экология»; 2010. 152 с.

3. Волчек АА, Безручко АВ. Экологическое состояние полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2022;2:117–122.
4. Богодяж ЕП, редактор. *Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2017 год*. Минск: [б. и.]; 2018. 450 с.
5. Saarela K-E, Harju L, Rajander J, Lill J-O, Heselius S-J, Lindroos A, Mattsson K. Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study. *Science of The Total Environment*. 2005;343(1–3):231–241.
6. Щербенко ТА, Копчик ГН, Гроненберг БЯ, Лукина НВ, Ливанцова СЮ. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения. *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2008;2:9–16.
7. Виноградов АП. *Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах*. Москва: Издательство АН СССР; 1957. 235 с.
8. Бузина ИН, Пузик ВК. Состояние почв и оценка окружающей среды вокруг полигона твердых бытовых отходов. *Вестник БГСХА*. 2014;3:102–106.

References

1. Lysukho NA, Eroshina DM. *Otkhody proizvodstva i potrebleniya, ikh vliyanie na prirodnuyu sredu. Monografiya* [Waste from production and consumption, their impact on the natural environment]. Minsk: MGEU named after A. D. Sakharov; 2011. 210 p. Russian.
2. Eroshina DM, Khodin VV, Zubritskiy VS, Demidov AL. *Ekologicheskie aspekty zakhoroneniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov na poligonakh. Monografiya* [Ecological aspects of solid municipal waste disposal at landfills]. Minsk: Belnits «Ecology»; 2010. 152 p. Russian.
3. Volchek AA, Bezruchko AV. *Ekologicheskoe sostoyanie polygonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov Brestskoi oblasti* [The ecological state of landfills of solid municipal waste in the Brest region]. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2022;2:117–122. Russian.
4. Bogodyazh EP, editor. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus: rezul'taty nablyudeniya, 2017 god* [National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: results of observations, 2017]. Minsk: [publisher unknown]; 2018. 450 p. Russian.
5. Saarela K-E, Harju L, Rajander J, Lill J-O, Heselius S-J, Lindroos A, Mattsson K. Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study. *Science of The Total Environment*. 2005;343(1–3):231–241.
6. Shcherbenko TA, Koptsik GN, Gronenberg BYa, Lukina NV, Livantsova SYu. *Pogloshchenie elementov pitaniya i tyazhelykh metallov sosnoi v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya* [Absorption of nutrients and heavy metals by pine in conditions of atmospheric pollution]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Soil Science*/ 2008;2:9–16. Russian.
7. Vinogradov AP. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and scattered elements in soils]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1957. 235 p. Russian.
8. Buzina IN, Puzik VK. *Sostoyanie pochv i otsenka okruzhayushchei sredy vokrug poligona tverdykh bytovykh otkhodov* [Soil condition and environmental assessment around the landfill of solid household waste]. *Bulletin of the BGSXA*. 2014;3:102–106. Russian.

Статья поступила в редакцию 14.12.2024.
Received by editorial board 14.12.2024.