УДК: 504.064.4:628.472.3 **ISSN 1609-0691**
DOI: https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2026/3/121–128
Поступила в редакцию: 20.07.2026
Принята к публикации: 31.08.2026
Опубликована онлайн: 30.09.2026

Методика эколого-геологической типизации рекультивированных полигонов твердых коммунальных и промышленных малотоксичных отходов

©2026 И. П. Симонова[1] ✉, Ф. Н. Лисецкий[2]

[1]Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, набережная реки Мойки, 48, 191186, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, 308015, Белгород, Российская Федерация

Аннотация

Введение: рекультивация полигонов твердых коммунальных и промышленных малотоксичных отходов требует проведения комплексных инженерно-экологических изысканий и объективной оценки степени их воздействия на природную среду. Актуальной задачей является разработка методов эколого-геологической типизации полигонов по уровню экологической опасности для обоснованного выбора мероприятий по рекультивации и снижению экологических рисков.

Методика: предложенная методика основана на комплексном анализе природных и техногенных факторов с использованием качественных и количественных критериев, оцениваемых по бальной системе. Для характеристики состояния полигонов применялись суммарный показатель загрязнения почв, суммарный показатель загрязнения подземных вод, коэффициент фильтрации подстилающих пород, уровень радиационного фона, параметры площади, объема и продолжительности эксплуатации полигона, а также коэффициент симметрии листьев растений. Градации экологической опасности определялись на основе обработки 1400 эколого-геохимических измерений, выполненных в течение пяти лет на трех полигонах Липецкого промышленного района. По итоговой сумме баллов выделялись четыре категории состояния полигонов: экологическая норма, экологический риск, экологический кризис и экологическое бедствие.

Результаты и обсуждение: на основе комплексного анализа эколого-геохимических данных, полученных на полигонах Липецкого промышленного района, обосновано выделение четырёх градаций экологической опасности полигонов отходов (норма, риск, кризис, бедствие) и разработана система качественных и количественных критериев их типизации. Для каждого типа полигона предложены дифференцированные мероприятия по рекультивации на техническом и биологическом этапах.

Заключение: разработанная методика позволяет систематизировать полигоны отходов по уровню экологической опасности и проводить их дифференцированную оценку с учетом состояния почв, подземных вод, растительности, радиационного фона и особенностей размещения отходов. Апробация методики показала ее эффективность при классификации исследованных объектов, отнесенных к категориям экологического риска, кризиса и бедствия. Результаты типизации могут использоваться для обоснования проектных решений, выбора мероприятий технического и биологического этапов рекультивации, совершенствования экологического мониторинга и повышения экологической безопасности территорий.

Ключевые слова: методика типизации, полигоны отходов, экологическая опасность, рекультивация, инженерные изыскания, экологический риск, технический этап рекультивации, биологический этап рекультивации, загрязнение грунтов, подземные воды, экологический мониторинг.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Симонова Ирина Петровна, e-mail: kremneva83@yandex.ru

Для цитирования: Симонова И. П., Лисецкий Ф. Н. Методика эколого-геологической типизации рекультивированных полигонов твердых коммунальных и промышленных малотоксичных отходов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2026. № 3. С. 121–128. DOI: https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2026/3/121–128

Введение

Современное управление полигонами твердых коммунальных и промышленных малотоксичных отходов (далее – отходы) требует применения комплексных научно-технических методов, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду и повышение эффективности процессов рекультивации. Неотъемлемым и важнейшим этапом подготовки к рекультивации является проведение инженерных изысканий, обеспечивающих всесторонний анализ природных и техногенных условий участка. В их состав входят эколого-геологические, гидрогеологические и геодезические работы.

Полученные в ходе изысканий данные позволяют объективно оценить состояние грунтов, подземных вод и других компонентов окружающей среды, выявить зоны загрязнений, определить уровень экологической опасности и оценить риски для здоровья населения и экосистем. Кроме того, результаты инженерных изысканий служат основой для разработки эффективных мероприятий по рекультивации, направленных на восстановление нарушенных земель и предотвращение дальнейшего загрязнения. Такой подход способствует обеспечению экологической безопасности и рациональному природопользованию, отвечая современным нормативным требованиям и целям устойчивого развития [1–3].

В рамках рассматриваемой проблематики особое значение приобретает разработанная методика эколого-геологической типизации полигонов отходов по уровню их экологической опасности (далее – методика), которая выступает как вспомогательный инструмент инженерных изысканий. Методика позволяет систематизировать и классифицировать полигоны отходов на основе комплексного анализа экологических параметров и природно-техногенных факторов, что способствует более точной оценке угроз и целенаправленному выбору мер по рекультивации. Такой подход обеспечивает интеграцию инженерно-экологических данных и дает возможность проводить дифференцированный анализ, учитывающий специфику каждого полигона отходов и масштабы его воздействия на окружающую среду.

Методика

Данная методика базируется на методических разработках Л. П. Грибановой, О. М. Гуман (2009 г), отличается дополнительным введением новых трех качественных и шести количественных критериев типизации с применением бального подхода [4, 5]. В качестве основных количественных критериев для исследования загрязнения почв (или грунтов) использовались значения суммарного показателя загрязнения (Z_c), для исследования подземных вод суммарный показатель загрязнения (СПЗ), характеристика изменения растительности оценивалась по показателю $К_{сим.}$

Суммарный показатель концентрации рассчитывался по следующей формуле:

$$Z_c = \sum (K_{ci} + \cdots + K_{cn}) - (n-1) \quad (1)$$

где n – число определяемых суммируемых веществ с $K_{ci} > 1$; K_{ci} – коэффициент концентрации i-го химического элемента, равный кратности превышения его содержания над фоновым значением; K_{cn} – коэффициент концентрации n-го химического элемента.

Если концентрация химического элемента не превышает его фонового значения, то по данному химическому элементу коэффициент концентрации не рассчитывают. Если по итогам данных опробования почв по всем химическим элементам отсутствуют превышения над их фоновыми значениями, расчет Z_c не выполняют [6].

Суммарный показатель загрязнения для подземных вод рассчитывается путем нормирования соединения элементов в пробе относительно предельно – допустимых концентраций.

$$СПЗ = \sum_{i=1}^{n} K^*_i \ -(n-1), \quad (2)$$

где K_i^* – коэффициент концентрации по каждому элементу, превышающему ПДК, рассчитывается по формуле:

$$K^*_i = \frac{C_i}{C_{ПДК}}, \quad (3)$$

где C_i – концентрации элемента в анализируемой пробе (мг/кг, мг/дм^3); $C_{ПДК}$ – нормируемая предельно допустимая концентрация данного элемента (мг/кг, мг/дм^3); n – количество анализируемых элементов.

Анализ тератологических исследований проводился путем расчета коэффициента симметрии по формуле:

$$K_{сим} = (S_м / S_б) * 100\% \ м \quad (4)$$

где $K_{сим}$ – это коэффициент симметрии листа, $S_м$ – площадь меньшей половины листа, $S_б$ – площадь большей половины листа. В качестве образца исследований использовались листья одуванчика, имеющего выраженную линию симметрии.

Число градаций типизации рассчитано на основании обработки 1400 эколого-геохимических измерений, проведенных за пятилетний период на трех полигонах. Возможность их использования при разработке критериев типизации обусловлена сходными эколого-геологическими условиями размещения исследуемых полигонов [7].

Обсуждение результатов

В результате анализа статистического материала был сделан вывод о целесообразности введения

четырех градаций, каждой из которых были присвоены соответствующие баллы экологической опасности. Так для качественных критериев были присвоены следующие баллы: 0 баллов – норма; 1 балл – риск; 2 балла – кризис; 3 балла – бедствие. Для большей достоверности оценки количественных критериев применяется метод скользящего балла, что позволяет более точно и дифференцировано устанавливать типы рассматриваемых полигонов: 0<N<1 – норма; 1≤N<2 – риск; 2≤N<3– кризис; 3≤N≤ 4– бедствие [8].

Применяемые критерии типизации полигонов отходов характеризуются как количественными, так и качественными показателями. Качественные критерии учитывают эколого-геологические особенности размещения отходов (положения в региональных структурах), технологические параметры накопления (состав отходов, способ накопления, стадии существования, условия размещения), параметры эколого-геологической оценки зон влияния (водный режим системы, микротекстурные особенности почвенных отложений), контроль за воздействием на окружающую среду [9]. Предложенные критерии типизации полигонов отходов выделены в таблицах (табл. 1, 2).

Табл. 1. Качественные критерии типизации полигонов отходов по уровню экологической опасности
[**Table 1.** Qualitative criteria for typification of waste landfills according to their level of environmental hazard]

N	Критерии типизации [Typification criteria]	Бальная оценка ($N_{кач}$) [Score (N_{qual})]			
		0	1	2	3
1	Состав складируемых отходов [Composition of stored waste]	ТКО [MSW]	ТКО + ПМО [MSW+ LTIW]	ПМО [LTIW]	ПО [IW]
2	Способ накопления [Method of accumulation]	Брикетирование [Briquetting]	Навалом на рельефе [Bulk placement on the relief]	Траншейный способ [Trench method]	Неупорядоченный [Unordered]
3	**Условия размещения [Placement conditions for waste]**	Герметично изолированные емкости [Hermetically sealed containers]	Частично изолированные [Partially isolated]	Отработанные карьеры, овраги [Abandoned quarries and ravines]	Поймы естественных и искусственных водоемов [Floodplains of natural and artificial water bodies]
4	**Стадии существования [Stages of existence]**	Ликвидирован [Closed and reclaimed]	Рекультивирован [Reclaimed]	На стадии рекультивации [At the reclamation stage]	Действующий [Operating]
5	Положения в региональных структурах [Provisions in regional structures]	Центральное водораздельное пространство [Central watershed area]	Высокие террасы рек [High river terraces]	Низкие террасы рек [Low river terraces]	Поймы рек [Floodplains of rivers]
6	Водный режим геотехнической системы «полигон – окружающая среда» [Water regime of the geotechnical system “landfill — surrounding environment”]	Непромывной [Non-leaching]	Частично промывной [Partially leaching]	Промывной [Leaching]	Основного питания стоками [Primarily fed by runoff]
7	**Микротекстуры [Microtextures]**	Матричная [Matrix	Слоистая [Layered]	Доменная [Domain]	Скелетная [Skeletal]
8	Контроль за воздействием на окружающую среду [Environmental impact control]	Контролируемый [Controlled]	Частично контролируемый [Partially controlled]	Периодически контролируемый [Periodically controlled]	Неконтролируемый [Uncontrolled]

На основе качественных критериев отнесение полигонов отходов к определенному типу производится по формуле 5:

$$N_{кач} = \sum_{i=8}^{n} N_i$$

где $N_{кач}$ – сумма баллов, определенная качественными критериями типизации; N_i – балл полигона отходов по определенному критерию типизации.

Для повышения достоверности оценок предлагается комплекс количественных критериев типизации полигонов по уровню экологической опасности.

Табл. 2. Количественные критерии типизации полигонов по уровню экологической опасности
[**Table 2.** Quantitative criteria for typifying landfills by their level of environmental hazard]

N	Критерии типизации [Typification criteria]	Бальная оценка ($N_{кол}$) [Score (N_{quant})]			
		0<N<1	1≤N<2	2≤N<3	3≤N≤ 4
1	Площадь полигона, (га) [Landfill area (ha)]	1 – 9	10 – 19	20 – 29	30 – 40
2	Объем отходов ($м^3$) [Waste volume (m^3)]	1000 – 9999	10000 – 99999	100000 – 999999	1000000 – 10000000
3	**Время существования полигона (лет) [Landfill lifetime (years)]**	0.1 – 0.9	1 – 19	20 – 39	40 – 60
4	**$К_ф$ подстилающих пород (м / сут) [Kf of underlying strata (m/day)]**	0.001 – 0.009	0.01 – 0.09	0.1 – 0.9	1 – 10
5	**По степени загрязнения почв (Z_c) [Soil pollution degree (SPZ)]**	<15.9	16 – 31.9	32 – 127.9	>128
6	**По степени загрязнения подземных вод (СПЗ) [Degree of groundwater pollution (SPZ)]**	0 – 0.9	1 – 4.9	5 – 9.9	10 – 15
7	**Радиационный фон (мкЗв/ч) [Radiation level (μSv/h)]**	0.1 – 0.15	0.15 – 0.2	0.2 – 0.29	≥ 0.3
8	**Характеристика изменения растительности ($К_{сим}$, %) [Characterization of vegetation changes (K_{sym}, %)]**	100 – 94.9	95 – 84.9	85 – 74.9	75 – 65

Количественные критерии типизации полигонов отходов по уровню экологической опасности учитывают пространственно-временные характеристики полигонов (площадь, объем и время накопления отходов), параметры эколого-геологической оценки зон влияния (загрязнение почв, подземных вод, трансформация радиационного поля, характер изменения растительности), а также коэффициент фильтрации подстилающих пород ($К_ф$) (табл. 2).

Табл. 3. Расчетные коэффициенты для определения количественного балла типизации
[**Table 3**. Calculation coefficients for determining the quantitative typification score]

Критерии [Criteria]	0<N<1		1≤N<2		2≤N<3		3≤N≤ 4	
	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1
S	0	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0.1
V	0	0.0001	0.9	0.00001	1.9	0.000001	2.9	0.0000001
t	0	1	1	0.05	1	0.05	1	0.05
$К_ф$	0	100	1	10	1.85	1.25	1.85	1.25
Z_c	0	0.125	0	0.125	1	0.0625	0	0.0625
СПЗ	0	1	1	0.2	1	0.2	1	0.2
P	-2	0.25	-2	0.25	-2	0.25	-2	0.25
$К_{сим}$	20	-0.2	10.5	-0.1	10,5	-0.1	10.5	-0.1

Бальную оценку количественных критериев типизации полигонов отходов предлагается производить по формуле 6:

$$N_{кол} = \sum_{i=8}^{n} a_0 + a_1 * x \quad (6)$$

где x – значение характеристики количественного критерия; a_1, a_0 – расчетные коэффициенты, определяемые по табл. 3; $N_{кол}$ – сумма баллов, определенная по количественным критериям типизации.

Сумма полученных баллов рассчитывается по формуле 7:

$$N_{общ} = \sum_{i=16}^{n} N_{кач} + N_{кол} \quad (7)$$

На основании экспертных оценок ряда авторов (О. М. Гуман, Л. П. Грибановой, О. Н. Грязнова и др.), а также проведенных авторских эколого-геологических исследований были выделены типы полигонов отходов по уровню экологической опасности (табл. 4).

Таким образом, алгоритм разработанной методики типизации полигонов отходов состоит в следующем:

1. Рассчитываются количественные параметры типизации по формулам 1−4.

2. Производится суммация полученных баллов с учетом качественных и количественных критериев по формулам 5, 6.

3. Определяется общая сумма полученных баллов по формуле 7.

4. С учетом таблицы 4 определяется категория экологической опасности полигона отходов.

Разработанная методика эколого-геологической типизации полигонов отходов с учётом комплексного анализа трансформации компонентов природной среды и технологических циклов обращения с отходами была успешно апробирована на примере трёх полигонов отходов Липецкого промрайона. Практическое применение разработанной методики позволило эффективно выявить и классифицировать полигоны по уровню экологической опасности, используя как количественные, так

и качественные критерии, что привело к определению одного полигона отходов как относящегося к экологическому риску, второго – к экологическому кризису, а третьего – к экологическому бедствию.

В настоящее время исследуемые полигоны отходов прошли рекультивацию, при этом разработанная методика подтвердила свою высокую эффективность в системной оценке экологических последствий и в планировании мероприятий по восстановлению земельных участков. Данная методика может служить примером для внедрения на аналогичных объектах рекультивации в других регионах, способствуя обеспечению экологической безопасности и устойчивого развития.

Для каждого выделенного типа полигона отходов предлагаются варианты мероприятий по рекультивации, учитывающие его специфические особенности и степень экологического воздействия (табл. 5).

Табл. 4. Типизация полигонов отходов по уровню экологической опасности
[**Table 4.** Typification of waste landfills by environmental hazard level]

Количество баллов (∑) [Number of points (∑)]	Категория экологической опастности [Category of environmental hazard]	Тип полигона [Type of landfill]
0 – 7.9	Экологическая норма [Environmental standard]	1
8 – 15.9	Экологический риск [Environmental risk]	2
16 – 23.9	Экологический кризис [Environmental crisis]	3
> 24	Экологическое бедствие [Environmental disaster]	4

Табл. 5. Мероприятия по рекультивации полигонов отходов по типу полигона и уровню экологической опасности
[**Table 5.** Reclamation measures for waste landfills by landfill type and environmental hazard level]

Тип полигона [Type of landfill]	Мероприятия на техническом этапе рекультивации [Measures at the technical stage of reclamation]	Мероприятия на биологическом этапе рекультивации [Measures at the biological stage of reclamation]
1	2	3
1	1. Подготовка и выравнивание поверхности полигона [1. Preparation and leveling of the landfill surface] 2. Устройство дренажных систем для отвода фильтрата и дождевых вод [2. Installation of drainage systems for leachate and rainwater removal] 3. Обеспечение сбора и утилизации биогаза (если предусмотрено) [3. Provision of biogas collection and utilization (if applicable)] 4. Создание защитного экрана (изолирующего слоя) для предотвращения проникновения загрязняющих веществ в грунт и воду [4. Construction of a protective screen (insulating layer) to prevent the penetration of pollutants into soil and water]	1. Нанесение слоя потенциально плодородной почвы [1. Application of a potentially fertile soil layer] 2. Высадка устойчивых к местным условиям растений и зеленых насаждений для стабилизации почвы и восстановления биоразнообразия [2. Planting of locally adapted plants and green plantations to stabilize the soil and restore biodiversity] 3. Организация ухода за растительностью в первые годы после посадки [3. Organization of vegetation maintenance during the first years after planting]
2	1.Усиленное обустройство дренажных систем с учетом потенциального загрязнения [1. Enhanced arrangement of drainage systems taking into account potential contamination] 2. Устройство многослойных изоляционных экранов (например, глинистых и геосинтетических слоев) [2. Installation of multi-layer insulation screens (e.g., clay and geosynthetic layers)] 3. Организация сбора, дегазации и утилизации биогаза для снижения риска взрывоопасности и загрязнения воздуха [3. Organization of biogas collection, degassing, and utilization to reduce the risk of explosion and air pollution] 4. Очистка фильтрата до нормативных значений или его утилизация [4. Treatment of leachate to meet regulatory standards or its disposal]	1. Заготовка и нанесение плодородного слоя с улучшенными физико-химическими характеристиками [1. Preparation and application of a fertile layer with improved physico-chemical characteristics] 2. Высадка растений с высокой фитосанитарной способностью (поглощающих вредные вещества) [2. Planting of plants with high phytosanitary capacity (capable of absorbing harmful substances)] 3. Мониторинг состояния растительности и почвы, корректировка ухода [3. Monitoring of vegetation and soil conditions, with adjustment of maintenance measures]

Продолжение Табл.5
[Continued Table 5]

1	2	3
3	1. Комплексная изоляция тела полигона с применением современных инженерно-геологических решений [1. Comprehensive isolation of the landfill body using modern engineering and geological solutions] 2. Обустройство систем дегазации с улавливанием и переработкой газов высокого экологического риска [10] [2. Installation of degassing systems with capture and processing of high-environmental-risk gases [10]] 3.Организация фильтрата с многоступенчатой очисткой (механико-биологической и химической) [3. Organization of leachate treatment with multi-stage purification (mechanical-biological and chemical)] 4. Контроль качества подземных и поверхностных вод [4. Quality control of groundwater and surface water]	1. Биокоррекция почв с использованием специфических рекультивационных материалов [1. Biocorrection of soils using specific reclamation materials] 2.Использование биоремедиационных технологий с селективным подбором растений и микроорганизмов [2. Application of bioremediation techniques with targeted selection of plant species and microbial strains] 3. Восстановление растительного покрова с использованием адаптированных к тяжелым условиям видов [3. Restoration of the vegetation cover using species adapted to harsh conditions]
4	1. Глубокая капитальная реконструкция зоны полигона с полной многослойной изоляцией [1. Deep capital reconstruction of the landfill area with full multi-layer isolation] 2. Интенсивная система сбора, дегазации и утилизации опасных газов [2. Intensive system for the collection, degassing, and utilization of hazardous gases] 3. Многоступенчатая очистка фильтрата с применением новейших технологий [11] [3. Multi-stage leachate treatment using the latest technologies [11]] 4. Постоянный мониторинг состояния экосистемы, почв и водных объектов [4. Continuous monitoring of the ecosystem, soil, and water bodies]	1. Усиленная биологическая рекультивация с применением генетически устойчивых или специально выведенных видов [1. Enhanced biological reclamation using genetically stable or specially bred species] 2. Введение техник микробиологической ремедиации для нейтрализации токсичных компонентов [2. Introduction of microbiological remediation techniques for the neutralization of toxic components] 3. Длительное поддержание и уход за восстановленной зелёной зоной [3. Long-term maintenance and care of the restored green area]

Заключение

Разработанная методика эколого-геологической типизации полигонов отходов по уровню экологической опасности представляет собой систематизированный и наукоемкий инструмент, призванный обеспечить объективную и дифференцированную оценку воздействия каждого полигона на природную среду. Методика базируется на комплексном анализе природных и техногенных факторов, включающих химико-биологическое состояние почв, гидрогеологические параметры, а также степень загрязнения окружающей среды и рисков для экосистем и здоровья населения.

Основным достоинством предложенного подхода является интеграция качественных и количественных критериев, что позволяет всесторонне оценить экологическую значимость полигона, выделить зоны наибольшего риска и классифицировать объекты в зависимости от их экологической опасности. Результаты типизации служат фундаментом для научно обоснованного планирования мероприятий по рекультивации полигонов, учитывающего специфику каждого объекта, его состояние и потенциальные угрозы.

Методика и предлагаемые мероприятия по рекультивации отходов повысят эффективность результатов инженерно-экологических изысканий, обеспечивая адекватное отражение динамики природно-техногенных процессов в зоне влияния полигона. На основе полученных данных осуществляется обоснованный выбор оптимальных мероприятий технического и биологического этапов рекультивации, направленных на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. Внедрение такого комплексного подхода существенно повышает качество и результативность работ по восстановлению природных экосистем, способствует рациональному природопользованию и укрепляет экологическую безопасность территорий, прилегающих к полигонам отходов.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новикова Е. Ю. Внедрение новых технологий рекультивации на полигонах ТКО в России // *Экология и жизнь.* 2024. № 1. С. 42–48.
2. Петрова И. Н., Сидоров А. В. Практические аспекты рекультивации полигонов ТКО в России // *Экология и природопользование.* 2022. Т. 15. № 2. С. 78–85.
3. Рожков Р. С., Григорьев С. М., Целуйко А. В. Мусорные полигоны: современные вызовы и стратегии управления // *Безопасность жизнедеятельности*. 2025. № 10. С. 34–45.
4. Грибанова Л. П., Грязнов О. Н., Гуман О. М., Панин Н. Н., Табаксблат Л. С., Шабалина Н. С. Инженерно-геоэкологические изыскания полигонов твердых бытовых и промышленных отходов: учебное пособие. Екатеринбург:

УГГГА, 2000. 50 с.
5. Гуман О. М. Полигоны твердых бытовых и промышленных отходов Свердловской области. Екатеринбург: Полиграфист, 2008. 176 с.
6. СП 502.1325800.2021. Инженерно-экологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16.07.2021 № 475/пр.
7. Косинова И. И., Кремнева И. П. Эколого-геологическая оценка территории для целей размещения полигона ТБО // *В сборнике: Обеспечение экологической безопасности в чрезвычайных ситуациях.* Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. Воронеж, 2006. С. 252-256.
8. Кремнева И. П., Косинова И. И. Классификация полигонов отходов и экологическая безопасность территории // *Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации*. 2008. № 1–2 (20–21). С. 54–62.
9. Бударина В. А., Косинова И. И., Попов В. И., Яковлев Ю. В. Методология и правовое обоснование структуры размещения особо охраняемых природных территорий: монография. Воронеж: Истоки, 2015. 213 с.
10. Przydatek G. Assessment of the impact of a non-operational municipal landfill site on groundwater quality: a case study from southwestern Poland // *Environmental Monitoring and Assessment.* 2025. Vol. 197. No. 8. 872 p.
11. Głażewski K., Vaverková M. D. Landfill reclamation using the example of the municipal waste disposal plant in Puławy – a case study // *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*. 2024. Vol. 23. P. 274–286.

UDC: 504.064.4:628.472.3 **ISSN 1609-0691**
DOI: https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2026/3/121–128
Received: 20.07.2026
Accepted: 31.08.2026
Published online: 30.09.2026

Methodology for Geoecological Typification of Reclaimed Landfills for Municipal Solid and Industrial Low-Toxicity Waste

©2026 I. P. Simonova[1] ✉, F. N. Lisetsky[2]

[1]Herzen State Pedagogical University of Russia, Moika River Embankment, 48, 191186, Saint Petersburg, Russian Federation
[2]Belgorod State National Research University, Pobedy St., 85, 308015, Belgorod, Russian Federation

Abstract

Introduction or purpose: reclamation of landfills for municipal solid and industrial low-toxicity waste requires comprehensive engineering and environmental surveys and an objective assessment of their impact on the natural environment. An urgent task is the development of methods for geoecological typification of landfills according to their level of environmental hazard in order to substantiate the selection of reclamation measures and reduce environmental risks.

Methodology: the proposed methodology is based on a comprehensive analysis of natural and technogenic factors using qualitative and quantitative criteria evaluated on a point-scale system. To characterize the state of landfills, the following indicators were applied: the total soil pollution index, the total groundwater pollution index, the filtration coefficient of underlying strata, the radiation background level, parameters of landfill area, waste volume, and operational duration, as well as the leaf symmetry coefficient of plants. The gradations of environmental hazard were determined based on the processing of 1,400 environmental and geochemical measurements carried out over a five-year period at three landfills in the Lipetsk industrial district. Based on the total score, four categories of landfill state were identified: environmental norm, environmental risk, environmental crisis, and environmental disaster.

The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Irina P. Simonova, e-mail: kremneva83@yandex.ru

Results and discussion: based on a comprehensive analysis of environmental and geochemical data obtained from landfills in the Lipetsk industrial district, the allocation of four gradations of environmental hazard for waste landfills (norm, risk, crisis, disaster) has been substantiated, and a system of qualitative and quantitative criteria for their typification has been developed. For each landfill type, differentiated reclamation measures for the technical and biological stages have been proposed.

Conclusion: the developed methodology allows systematization of waste landfills according to their level of environmental hazard and their differentiated assessment taking into account the state of soils, groundwater, vegetation, radiation background, and specific features of waste placement. The approbation of the methodology demonstrated its effectiveness in classifying the studied objects, which were assigned to the categories of environmental risk, crisis, and disaster. The typification results can be used to substantiate design decisions, select measures for the technical and biological stages of reclamation, improve environmental monitoring, and enhance the environmental safety of territories.

Keywords: methodology of typification, landfills, ecological hazard, reclamation, engineering surveys, ecological risk, technical phase of reclamation, biological phase of reclamation, soil contamination, groundwater, environmental monitoring.

For citation: Simonova I. P., Lisetsky F. N. Methodology for Geoecological Typification of Reclaimed Landfills for Municipal Solid and Industrial Low-Toxicity Waste // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology,* 2026, no. 3, pp. 121–128. DOI: https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2026/3/121–128

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Novikova E. Ju. Vnedrenie novyh tehnologij rekul'tivacii na poligonah TKO v Rossii [Implementation of new reclamation technologies at municipal solid waste landfills in Russia]. *Ekologiya i zhizn' − Ecology and Life*, 2024, no. 1, pp. 42–48 (In Russ.).

2. Petrova I. N., Sidorov A. V. Prakticheskie aspekty rekul'tivacii poligonov TKO v Rossii [Practical aspects of municipal solid waste landfill reclamation in Russia]. *Ekologiya i prirodopol'zovanie − Ecology and Environmental Management*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 78–85 (In Russ.).

3. Rozhkov R. S., Grigor'ev S. M., Celujko A. V. Musornye poligony: sovremennye vyzovy i strategii upravleniya [Municipal solid waste landfills: current challenges and management strategies]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti − Life Safety*, 2025, no. 10, pp. 34–45 (In Russ.).

4. Gribanova L. P., Gryaznov O. N., Guman O. M., Panin N. N., Tabaksblat L. S., Shabalina N. S. *Inzhenerno-geoekologicheskie izyskaniya poligonov tverdyh bytovyh i promyshlennyh othodov: uchebnoe posobie* [Engineering and geoecological surveys of municipal solid and industrial waste landfills: study guide]. Ekaterinburg, UGGGA publ., 2000, 50 p. (In Russ.).

5. Guman O. M. *Poligony tverdyh bytovyh i promyshlennyh othodov Sverdlovskoj oblasti* [Municipal solid and industrial waste landfills of the Sverdlovsk region]. Ekaterinburg, Poligrafist publ., 2008, 176 p. (In Russ.).

6. SP 502.1325800.2021. *Inzhenerno-ekologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. Obshchie pravila proizvodstva rabot* [Engineering and environmental surveys for construction. General rules for the performance of work]. Approved by Order of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation of July 16, 2021, no. 475/pr. (In Russ.).

7. Kosinova I. I., Kremneva I. P. Ekologo-geologicheskaya ocenka territorii dlya celej razmeshcheniya poligona TBO [Ecological and geological assessment of a territory for the purpose of locating a municipal solid waste landfill]. *Obespechenie ekologicheskoj bezopasnosti v chrezvychajnyh situaciyah*: materialy konferencii [Ensuring environmental safety in emergency situations: materialy conference]. Voronezh, VSU publ., 2006, pp. 252–256 (In Russ.).

8. Kremneva I. P., Kosinova I. I. Klassifikaciya poligonov othodov i ekologicheskaya bezopasnost' territorii [Classification of waste landfills and environmental safety of the territory]. *Ekologiya Central'no-Chernozemnoj oblasti Rossijskoj Federacii − Ecology of the Central Black Earth Region of the Russian Federation*, 2008, no. 1–2 (20–21), pp. 54–62 (In Russ.).

9. Budarina V. A., Kosinova I. I., Popov V. I., Yakovlev Ju. V. *Metodologiya i pravovoe obosnovanie struktury razmeshcheniya osobo ohranyaemyh prirodnyh territorij: monografiya* [Methodology and legal substantiation of the structure for the establishment of specially protected natural areas: monograph]. Voronezh, Istoki publ., 2015, 213 p. (In Russ.).

10. Przydatek G. Assessment of the impact of a non-operational municipal landfill site on groundwater quality: a case study from southwestern Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, vol. 197, no. 8, 872 p.

11. Głażewski K., Vaverková M. D. Landfill reclamation using the example of the municipal waste disposal plant in Puławy – a case study. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 2024, vol. 23, pp. 274–286.

Симонова Ирина Петровна, к.г.н., доцент Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
e-mail: kremneva83@yandex.ru;
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7350-2314

Лисецкий Федор Николаевич, д.г.н, профессор Белгородского государственного национально исследовательского университета, Белгород, Российская Федерация;
e-mail: Liset@bsuedu.ru;
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1663-9346

Irina P. Simonova, PhD in Geography, Associate Professor, Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: kremneva83@yandex.ru;
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7350-2314

Fedor N. Lisetsky, Dr. habil. in Geography, Professor, State National Research University, Belgorod, Russian Federation;
e-mail: Liset@bsuedu.ru;
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1663-9346

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Authors have read and approved the final manuscript.