

## УТИЛИЗАЦИЯ И ЗАХОРОНЕНИЕ ОТХОДОВ

УДК 553.6 (504)

### БАРЬЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОЛИГОНОВ ТКО

© 2025 г. В. Г. Заиканов<sup>1</sup>, И. Н. Заиканова<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), Уланский пер. 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: izaikanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.10.2024 г.

После доработки 15.11.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

В статье рассматриваются понятийный аппарат и возможность применения барьеров безопасности при проектировании полигонов ТКО. Оцениваются их существующие классификации и опыт применения в настоящее время. В статье представлено использование концепции безопасности, базирующейся на систематическом описании различных типов барьеров (мультибарьеры) на примере барьеров для полигонов ТКО. Рассматривается международный опыт использования барьеров безопасности, а также их применение при проектировании полигонов ТКО в России. Предлагается широко использовать учение о геохимических барьерах, являющееся достижением российской науки. Рассматриваются варианты создания искусственных геохимических барьеров, хорошо зарекомендовавших себя для нейтрализации опасных отходов металлургической и горнодобывающей промышленности. Приводится принципиальная схема метода оценки ожидаемой опасности — “галстук-бабочка”, и рассматривается возможность его применения для оценки рисков опасности воздействия окружающей среды на полигон и полигона на геологическую среду.

**Ключевые слова:** барьер, безопасность, полигон, твердые коммунальные отходы

DOI: 10.31857/S0869780925020058 EDN: EРХСWН

#### ВВЕДЕНИЕ

Термин “барьер” вошел в практику охраны окружающей среды человека из системы базовых понятий техники безопасности человека на производственных и других объектах, где использование концепции барьеров безопасности базируется на систематическом описании различных их типов. В статье рассматривается опыт применения барьеров безопасности, который с некоторыми оговорками и дополнениями можно применить в отношении барьеров, используемых при проектировании полигонов твердых коммунальных отходов (ТКО). В качестве основы целесообразно взять теорию, а отчасти и практику применения таких понятий, как барьеры, барьерная функция, барьерная система и их разновидности, рассмотренных в работах, большей частью, зарубежных авторов [14–16].

В мировой и отечественной научной литературе понятие “барьеры безопасности” применяется в достаточно широком смысле. В российском

законодательстве этот термин употребляется исключительно в связи с менеджментом рисков, а именно: в стандартах ГОСТ Р 54141, ГОСТ Р 54142, ГОСТ Р 54143, ГОСТ Р 54144, хотя, как это предусмотрено Постановлением Правительства РФ от 28.05.2021 № 815 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил, в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований федерального закона “Технический регламент о безопасности зданий и сооружений”» (30 декабря 2009 г. N 384-ФЗ), они не относятся к числу обязательных для исполнения. Согласно нормативным документам источниками риска при проектировании полигонов ТКО являются близкое залегание грунтовых вод, неблагоприятные для размещения полигона геологическое строение, гидрогеологические условия, рельеф, климатические условия и др. Соблюдение требований безопасности при этом возлагается на барьеры безопасности, т.е. запланированные меры, обеспечивающие защиту в процессе функционирования полигонов ТКО, а в

случае опасности или аварии, смягчающие последствия, вызванные неблагоприятными событиями.

Прежде чем говорить о безопасности, необходимо определить, что такое опасность и последствия ее реализации. Принимая во внимание исследования Trbojevic V.M. [17], предлагаем такую адаптацию исследований автора к тематике полигонов ТКО.

*Опасность* — физическая ситуация, состояние или объект, которые потенциально могут причинить ущерб окружающей среде, например, опасность затопления полигона ТКО.

*Угроза* относится к событиям, при которых опасность может быть реализована, например, угрозой затопления полигона ТКО может быть возможность прорыва дамбы водохранилища, расположенного недалеко от него.

*Неблагоприятное событие* — опасность, реализовавшаяся в результате непреднамеренного отклонения от нормальной ситуации, в результате чего причиняется определенный ущерб. Дата, обстоятельства и место совершения события фиксируются.

*Последствие* — результат от реализовавшегося события, который может выражаться в виде ущерба полигону, геологической среде, другим компонентам окружающей среды, населению и т.д.

*Барьер безопасности* — конструктивный элемент сооружения, в частности, полигона ТКО. Он может быть физическим или нефизическим, а также их сочетанием, и предназначен для предотвращения, контроля, смягчения последствий или защиты от нежелательных событий.

*Режим ослабления/отказа барьера* указывает на отклонение функции барьера от проектного замысла. Это может быть результатом ослабления функции барьера, полного отказа или его удаления. Примерами разрушения барьера могут быть постепенное разрушение тканевых и других барьеров, предусмотренных для изоляции отдельных слоев свалочной массы от воздействия воды, фильтрата; нарушение работы системы удаления свалочного газа на полигоне и даже ошибка, допущенная при обучении персонала действиям при аварийных ситуациях.

*Устойчивость* — характеристика системы управления безопасностью природных, технологических и других процессов, позволяющая предвидеть и устранять угрозы для ее целей в области безопасности функционирования полигона ТКО.

Терминология, связанная со стратегией обеспечения безопасности для окружающей среды и населения проектируемых полигонов ТКО, требует усовершенствования, расширение ее диапазона позволяет давать более точные оценки и рекоменда-

ции. Согласно существующим литературным данным [8], приняты следующие определения, связанные с барьерами.

*Барьеры безопасности* — функция, изделие, материал, программное обеспечение, действие оператора и т.д., цель которых заключается в остановке или замедлении развития опасной ситуации. Барьером безопасности также могут быть физическое свойство, конструктивная характеристика, технологическое устройство или вмешательство человека, например, сигнал тревоги с действиями оператора. К ним можно добавить естественные и искусственные барьеры, которые действуют в природной среде (о них будет речь ниже).

*Барьерная функция* — деятельность или действие, направленные на предотвращение, контроль или смягчение нежелательных событий или аварий. В отношении охраны природной среды при проектировании полигонов ТКО это виды обеспечения безопасности практически всех компонентов природной среды и социума. Успешная реализация барьерной функции оказывает значительное влияние на нейтрализацию развития нежелательных событий или аварий.

*Барьерная система* — совокупность связанных между собой элементов, которые спроектированы и реализованы для исполнения одной или нескольких барьерных функций. Барьерная система создается для того, чтобы реализовать всю совокупность барьерных функций для обеспечения охраны природной среды и, в частности, геологической составляющей. В российской и зарубежной литературе по полигонам ТКО используется синоним барьерной системы — мультибарьер.

Барьерную систему целесообразно дифференцировать на *барьерные элементы или подсистемы*, необходимые для исполнения нескольких или одной барьерной функции. Барьерная подсистема может содержать также несколько резервных барьерных элементов, существующих, например, на случай аварийных ситуаций. Барьерная система может включать элементы различных типов, например, физические и технические элементы, т.е. аппаратные и программные, организационные, контрольные и другие структуры, без которых барьерная функция не может быть выполнена [16]. Без обоснованного на этапе проектирования полигона ТКО комплекса барьерных функций не может быть обеспечена охрана социума, природной и, в частности, геологической среды. Не исключено, что для реализации одной барьерной функции потребуется несколько барьерных систем, например, для нейтрализации затопления необходимо предусмотреть барьеры в самом свалочном теле, на днище и в склонах котлована полигона.

Целесообразно рассмотреть также существующие классификации барьеров. Наиболее

детальная классификация барьеров безопасности предлагается методом ARAMIS [12]. В отличие от большинства других методов, ARAMIS различает следующие барьерные функции: *избежать* (сделать потенциально опасное событие невозможным); *препятствовать* (затормозить потенциально опасное развитие событий, поместить на пути развития событий препятствие); *управлять* (обнаружить потенциально опасное событие и вернуть систему назад в безопасное состояние); *ограничить, уменьшить или смягчить* (обнаружить потенциально опасное событие и ограничить его во времени и/или пространстве, уменьшить его масштаб или смягчить воздействия опасного явления на оборудование, человека и окружающую среду). Согласно методике ARAMIS выделяют следующие барьерные системы.

**Пассивные барьеры** постоянно функционируют и не требуют действий оператора, источника энергии и информации. Они могут быть физическими (обвалование, стены и т.д.), постоянными (система предотвращения коррозии), отвод подземных вод или геологический барьер на полигоне ТКО.

**Активируемые барьеры** устанавливают предвзятые условия, необходимые для совершения действия. Таким образом, для срабатывания данные барьеры должны быть автоматическими или активируемыми вручную. Эти барьеры могут быть механическими, которые требуются активировать для исполнения их функции (аппаратные). Активируемым барьерам всегда требуется последовательность “обнаружение—оценка—действие”. Данная последовательность может быть реализована с использованием аппаратных, программных и (или) человеческих действий.

Trbojevic V.M. [17] предлагает несколько отличный подход к классификации барьеров безопасности, основанный на оценке их эффективности в случае возникновения потенциально опасной ситуации. В зависимости от степени эффективности (высокая, средняя, низкая) выделяют следующие типы барьеров безопасности.

**Технические** (высокая эффективность). Могут предотвратить распространение факторов риска, снизить опасность ситуации, смягчить последствия или уменьшить вероятность возникновения факторов риска. Если технический барьер не срабатывает, то угроза передается на другой технический барьер до реализации потенциально опасного события (до достижения инициирующего события). Примерами технических барьеров, действующих по такому принципу, могут служить дренажная труба, проложенная в теле свалки и система гидроизоляции на ее контакте с основанием на полигоне ТКО.

Выделяют следующие подкатегории технических барьеров: *технические активные*, которые

срабатывают по требованию (аварийный отсекающий клапан, дренажная система пожаротушения, аварийная емкость); *технические пассивные* функционируют на постоянной основе, исполняют барьерную функцию одним своим присутствием (предохранительный клапан, обвалование, пожаропрочные и взрывонепроницаемые перегородки и т.п.); *технические барьеры контроля*, активирующие другие предотвращающие или смягчающие последствия опасного события барьеры (газосигнализаторы, система пожарной сигнализации, система оповещения об аварии и т.д.). Барьеры данного типа не могут предотвратить развитие аварии, но могут активировать другие барьеры, которые это сделают.

**Человеческие** (организационные) (средняя эффективность). Способствуют контролю процесса или деятельности, могут уменьшить вероятность инициирующего события путем укрепления других барьеров или предотвращения их ослабления. Но в случае, если потенциально опасное событие уже инициировано, то барьеры этого типа, как правило, не могут ни предотвратить его развитие, ни уменьшить последствия. На полигонах ТКО этот тип барьеров имеет широкое применение, он необходим для ведения мониторинга состояния геологической среды, слежения за соблюдением правил эксплуатации полигона, отчасти при выполнении сортировки отходов и др.

**Фундаментальные** (низкая эффективность). Их действие разделяется во времени от возникновения угрозы до реализации фактора риска. Тем не менее фундаментальные барьеры вносят чрезвычайно важный и эффективный вклад в обеспечение безопасности системы путем проверок и контроля уязвимых мест системы и исходных причин отказов. К фундаментальным барьерам на полигонах ТКО можно отнести геологическое строение и гидрогеологические условия, как правило, “усиленные” применением технических барьеров.

В российских нормативно-правовых документах термин “барьеры безопасности” также упоминается [4–6, 10, 11]. В ГОСТ [4] дано определение слоя защиты, относящееся к методу анализа слоев защиты (LOPA): “*Слой защиты (protection layer): самостоятельный механизм, снижающий риск с помощью управления риском, его предотвращения или ослабления*”. Таким слоем, рассмотренным подробно ниже, при строительстве полигонов ТКО являются породы естественного или искусственного происхождения, обеспечивающие гидроизоляцию свалочного тела. Такое определение практически соответствует данному ниже определению геологического барьера безопасности.

## ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИБАРЬЕРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОЛИГОНОВ ТКО

Полигоны ТКО — природоохранные сооружения, которые предназначены для сбора, обезвреживания и захоронения бытовых отходов. При этом сам полигон — это объект повышенной геохимической опасности, источник загрязнения окружающей среды. В идеале инородное для природной среды тело должно быть изолировано от контактов до тех пор, пока его воздействие не станет нейтральным. Для полной локализации свалочного тела используются различные подходы, но главное условие — это возведение “стен” между свалочным телом и контактирующей с ним геологической средой, подземными водами, почвами и другими компонентами природы.

Для обеспечения долгосрочной безопасности полигоны ТКО должны быть оборудованы барьерной системой в соответствии с принятой мультибарьерной концепцией. Эта концепция основана на том, что даже если какой-то барьер выйдет из строя, все равно будет обеспечена эффективная защита окружающей среды. Для этого необходимо использовать комплекс искусственных и естественных барьеров, который включает следующие составляющие.

1. *Раздельный сбор отходов.* Этот барьер обеспечивает возможность разных подходов к захоронению или утилизации отходов. Важным следствием этого барьера на пути к свалке является уменьшение массы захороняемых отходов, а значит и размера полигона.

2. *Предварительная сортировка отходов.* Отходы, содержащие биоразлагаемые и другие органические компоненты, такие как ТКО, по мнению специалистов, должны быть предварительно рассортированы на мусоросжигательных заводах или заводах механико-биологической очистки, прежде чем они будут отправлены на полигоны. Это способствует уменьшению загрязняющих атмосферу свалочных газов и загрязненных фильтрующих вод.

3. *Геологический барьер.* Геологическим барьером называется естественный грунт, залегающий под свалочным телом и вокруг него, который своими характеристиками и размерами в значительной степени препятствует распространению загрязняющих веществ. Геологический барьер в основном состоит из естественных отложений слабопроницаемых пород достаточной мощности с высоким потенциалом удержания загрязняющих веществ. Предполагается, что геологический барьер имеет обширное распространение за пределами зоны залегания свалочного тела.

4. *Минеральный уплотнительный слой.* Прослойка (с коэффициентом проницаемости  $K_f$  не менее

$5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ) с мощностью 0.50 м и конвекционным замком или пластиковая прокладка толщиной 2.5 мм из пленки в качестве комбинированного уплотнения.

5. *Мощный дренажный слой* создается для удержания и отвода фильтрата. Толщина слоя из гравия — 0.3 м.

6. *Ограждающие стены и днища полигона.* В свалочной толще происходят биологические, химические и физические процессы. Таким образом, для защиты окружающей среды полигон должен быть безопасным и иметь такую конструкцию, чтобы не допускать утечки свалочного газа и фильтрата в геологическую среду.

7. *Система гидроизоляции основания полигона с захватом и обработкой фильтрата.* Защита геологической среды и почв может быть достигнута за счет сочетания геологического барьера и системы гидроизоляции в основании свалочного тела. На полигонах ТКО достаточно установить слой минерального дренажа толщиной не менее 0.3 м над геологическим барьером, тогда как на полигонах с более высокими классами требуются дополнительные компоненты гидроизоляции (например, глина, пластиковая гидроизоляционная пленка). Важный элемент гидроизоляции — дренажные трубы, сбрасывающие фильтрат в очистные сооружения.

8. *Контроль фильтрата.* Оператор полигона должен поддерживать минимальное количество фильтрата, насколько это возможно в соответствии с современным уровнем оборудования полигона. Образующиеся фильтраты собираются и при необходимости обрабатываются на соответствующей очистной установке.

9. *Система гидроизоляции поверхности свалочного тела* на полигоне и сбора атмосферных осадков после его закрытия. Поверхностное уплотнение свалочного тела после его рекультивации должно предотвращать попадание в него осадков, а также утечку любого возможного свалочного газа. То же самое относится к дренажному слою, двум компонентам гидроизоляции и, при необходимости, к гидроизоляционным элементам. Необходимы выравнивающие и отводящие газ слои. Рекультивационный слой можно заменить техническим функциональным слоем, если этого требует целевое использование полигона (например, в качестве транспортной зоны, парковки и т.п.).

10. *Очистные сооружения, в которые сбрасываются фильтрат и вода, поступающая из атмосферы.*

11. *Последующий уход.* Если полигон рекультивирован, устанавливается необходимая система поверхностной гидроизоляции и производится вывод из эксплуатации. Измерения и проверки, производимые на этапах осаднения и эксплуа-

тации, должны продолжаться и после вывода его из эксплуатации на этапе последующего наблюдения. Должны измеряться следующие показатели: количество осадков, уровень и состав грунтовых вод, количество и состав фильтрата и свалочного газа. Кроме того, компоненты гидроизоляции регулярно проверяются на работоспособность. Только после того, как на этапе наблюдения будет достигнуто состояние свалки, при котором больше не может быть постоянного ущерба для населения без необходимости дальнейших технических или эксплуатационных действий, ответственный орган должен освободить свалку от последующего наблюдения.

Понятно, что весь комплекс названных выше действий должен получить свое подтверждение в соответствующих нормативных документах, чего сейчас нет!

### Геохимические барьеры

Широкий спектр проблем охраны окружающей среды выявил важнейшую научную и прикладную область применения геохимических барьеров — участков пространства, на которых происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрации [1]. В последние десятилетия для защиты окружающей среды от загрязнения наметилась тенденция использования геохимических барьеров, применение которых в ряде случаев позволяет отказаться от строительства сложных очистных сооружений и проведения других дорогостоящих природоохранных мероприятий. Однако широкое использование геохимических барьеров сдерживается отсутствием теоретических основ их практического применения при проектировании полигонов ТКО.

По мнению А.И. Перельмана [12], геохимический барьер — это участок литосферы, где резко уменьшается интенсивность миграции химических веществ и, как следствие, происходит аккумуляция элементов и соединений. Причем эти участки могут быть естественными и созданными искусственно. Широко применяются искусственные барьеры, которые могут быть спроектированы в зависимости от поставленной цели. Необходимо различать типы барьеров по характеру миграции загрязняющих веществ. Есть барьеры, “останавливающие” их перемещение. К ним относятся всякого рода преграды из бетона, пленок, глинистых грунтов и др. Геохимические барьеры в понимании А.И. Перельмана — это “пропускающие” барьеры, они не препятствуют движению растворов (фильтрата), но меняют их кислотность, осаждают на себе загрязняющие вещества, вступают с ними в реакцию и т.д. Учитывать особенности обоих типов барьеров очень важно, как и возможность их комплексного использования.

В настоящее время наметилось широкое применение в качестве барьера бентонитов, которые помимо того, что являются по гранулометрическому составу “останавливающей” разновидностью барьеров, обладают также высокой способностью адсорбировать различные вещества (масла, металлы, бактерии и токсины). Кроме того, они используются еще и в качестве осушающего агента.

Использование геохимических барьеров в области охраны геологической среды при создании полигонов ТКО позволяет решать возникающие проблемы наиболее простым способом, учитывая естественные защитные функции окружающей среды. Для этого используются методы, основанные на ускорении естественной трансформации загрязняющих веществ в неопасные формы или их целенаправленной концентрации на определенных, ограниченных по площади участках литосферы. Основываясь на теории геохимических барьеров, можно сформулировать принцип стратегического подхода к защите геологической среды от загрязнения.

Геохимические барьеры есть во всех природных обстановках, часто они моделируются и используются в хозяйственной деятельности. Образование физико-химических барьеров связано с резким изменением физико-химических условий: температуры, давления, окислительно-восстановительных, щелочно-кислотных и др. По факторам, определяющим концентрацию элементов, А.И. Перельман выделил классы барьеров, обозначенные им буквами латинского алфавита: кислородный (А), сульфидный или сероводородный (В), глеевый (С), щелочной (D), кислый (Е), испарительный (F), сорбционный (G), термодинамический (H), сульфатный (I) [12].

Главными показателями барьера являются *градиент  $G$* , который характеризует изменение геохимических показателей (температура, давление, Eh, pH и др.) в направлении миграции химических элементов в зависимости от ширины барьера, и *контрастность  $S$*  — отношение величины геохимических показателей в направлении миграции до и после барьера. Емкость барьера представляет собой величину, характеризующую максимальное количество веществ, способных накапливаться в единице массы субстрата.

Для создания геохимического барьера в основании и склонах полигона ТКО на этапе его проектирования необходимо проводить целый спектр исследований, включая определение показателя фильтрации каждого литологического пласта, составляющего геологическое строение территории, а также их химического состава и инженерно-геологических свойств. Если на доступной для строительства полигона глубине есть глинистые горизонты, они могут служить природным

фундаментальным барьером, препятствующим попаданию фильтрата в нижележащие горизонты и подземные воды. В качестве примера можно привести полигон “Кучино”, расположенный на месте отработанного глиняного карьера Кучинского керамического комбината [14]. В РФ и других странах принято, что глинистый слой на полигоне ТКО должен быть не менее 2–3 м. Если такой слой отсутствует в геологическом разрезе, его создают искусственно.

Для выбора типа барьера, кроме проведения комплекса лабораторных исследований, которые позволят оценить естественные защитные свойства среды, необходимо выбрать реагенты, способные выполнить роль барьеров. После этого может быть создана модель барьера и технологическая схема его создания: количество реагентов, способы их внесения, конструктивные особенности и т.д. Частным случаем этого принципа может являться разработка методов, основанных на поиске естественных участков литосферы с подобными свойствами в отношении загрязняющих веществ [14]. В качестве материалов для создания геохимических барьеров могут служить почвы, грунтовые толщи, торф и др. Для искусственных геохимических барьеров могут использоваться отходы горнопромышленного комплекса, содержащие химически активные материалы; смеси химически активных и модифицированных различным образом минералов; продукты и отходы химико-металлургической переработки руд и концентратов и др.

В зависимости от состава загрязнителей могут применяться в комплексе с природными образованиями и производственные отходы, что значительно снижает затраты и в известной мере решает проблему их утилизации. В ряде случаев локализация загрязнения может осуществляться, если при выборе участков складирования отходов используются и активизируются барьерные свойства самой природной среды.

Для создания геохимических барьеров, обеспечивающих условия консервации отходов и их полного разложения, необходимо учитывать не только фильтрационные, но и адсорбционные свойства грунтов оснований и бортов полигонов. Поскольку фильтрат полигонов ТКО обычно имеет кислую реакцию, для выпадения из него загрязняющих веществ могут использоваться карбонатные породы.

### Разновидности искусственных мультибарьеров

Часто, когда спектр загрязнителей не позволяет защитить окружающую среду с помощью какого-либо одного вида барьеров, для создания геохимических барьеров применяются природные или природоподобные материалы в комбинации в виде систем искусственных барьеров. Полезную информацию при этом может дать изучение при-

родных и техногенных аналогов геохимических барьеров. Например, применение для минимизации вредного влияния на окружающую среду отходов Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) был использован аналог природного материала — модифицированный торф с повышенным содержанием гуминовых кислот [2]. В качестве дополнительного сорбента был добавлен мраморизованный известняк Салаирского рудного поля с примесью доломита. При добавлении известняка происходит нейтрализация кислых растворов, а применение гуматов способствует образованию труднорастворимых соединений, в том числе с участием тяжелых металлов.

К первой группе техногенных барьеров относятся средства, предназначенные для задерживания загрязняющих веществ: фильтры, очистные сооружения, отстойники. Ко второй — “встроенные” техногенные геохимические барьеры, формирующиеся благодаря введению в природную среду веществ, резко меняющих геохимию природных процессов [13].

Отличительная особенность искусственных геохимических барьеров — возможность аккумуляции таких веществ, как нефтепродукты, полиароматические углеводороды, пестициды и др. Концентрации веществ, имеющих природные аналоги, на искусственных барьерах в ряде случаев значительно выше, чем на природных.

При использовании “пропускающих” барьеров необходимо учитывать такую их особенность, как кольматация, т.е. снижение фильтрационных характеристик фильтрующих элементов. В зарубежной литературе термин “кольматация” применяется для обозначения процесса механического осаждения частиц в поровом пространстве, а для обозначения химического осаждения различных минеральных соединений используется термин “инкрустация” (от англ. *incrustation* — образование корки, кора, плотное отложение). Эффективность работы фильтрующих барьеров значительно зависит от кольматационно-суффозионных процессов на контакте свалочной толщи полигона и геохимического барьера, а также образования на нем осадков механического, физико-химического и биологического происхождения. Эти явления определяют как мощность (ширину, по А.И. Перельману) и продолжительность действия такого барьера.

Сущность этих процессов необходимо знать для разработки методов подбора, расчета мощности барьера и продолжительности его службы. Кольматация может способствовать образованию искусственного механического барьера, ее можно использовать для уплотнения контакта склонов и днища свалочного тела. В результате кольматации происходит процесс заполнения порового пространства грунта или разного рода покрытий,

защита геологическую среду от проникновения более мелких частиц, находящихся во взвешенном состоянии в фильтрате. Кольматация в данном случае происходит благодаря механическому заполнению пор грунта и поверхностному взаимодействию частиц. Твердые взвешенные частицы суспензии, которой является фильтрат, могут механически задерживаться в порах грунтов, а также вступать в физико-химические взаимодействия со скелетом грунтового барьера и друг с другом с образованием коагуляционных структурных связей [3, 7].

Особую группу барьеров представляют искусственные биогеохимические барьеры, которые могут применяться для микробиологической очистки фильтрата. Например, использование сообщества микроорганизмов, которые активно участвуют в процессах окисления с выносом загрязняющих веществ и их трансформацией. В основе биоорганического комплекса, используемого для выщелачивания металлов, лежит торф с различными добавками.

Одним из возможных способов удаления взвешенных частиц могут быть искусственные, а в ряде случаев и естественные механические геохимические барьеры, предусматривающие пропускание фильтрата через фильтры из местных грунтов и отвалов. Подобные механические геохимические барьеры применяются для очистки от взвешенных частиц вод, образующихся при угледобыче [9]. Исследования, проведенные Ю.В. Лесиным, показали, что наиболее простую конструкцию имеют фильтры, размещенные в естественных или искусственных выемках (оврагах, логах, старых горных выработках и т.п.).

В ходе эксплуатации любого типа барьеров должны проводиться мониторинг его эффективности, вноситься необходимые корректировки в технологию. Эти действия должны доказательно найти свое отражение в нормативных документах по проектированию и эксплуатации полигонов ТКО.

Широкое применение геохимических барьеров сдерживается отсутствием методологии, позволяющей перейти от учения о геохимических барьерах к их практическому использованию при проектировании полигонов ТКО.

Особо надо остановиться на укреплении дна свалок, поскольку через него может осуществляться миграция фильтрата в геологическую среду и подземные воды. Применяемые в настоящее время в нашей стране изоляционные материалы не всегда являются оптимальным решением, поскольку подвержены со временем разрушению, в том числе и после рекультивации свалки, когда в ней не исключается действие процесса образования фильтрата. Поэтому, учитывая долгосрочную перспективу существования полигонов захороне-

ния ТБО, необходимо принять особо строгие меры по изоляции их дна с образованием соответствующих барьеров.

В качестве одного из положительных примеров создания таких барьеров можно привести опыт Германии (рис. 1). На принципиальной схеме гидроизоляции и дренажа основания свалочного тела показаны несколько барьеров:

- защитный и фильтрующий слой, верхняя насыпь мин. 40 см,
- труба для фильтрата, находится на асфальтовом покрытии,
- гравий для укладки трубы,
- фильтрующий нетканый материал, который применяется для гидроизоляции поверхности всей системы изолирующих барьеров и насыпей, труб для удаления фильтрата,
- асфальтовое гидроизоляционное покрытие,
- связующий слой под асфальтовым покрытием,
- фундаментный слой (насыпь из гравия и песка),
- насыпи для прокладки труб,
- труба для фильтрата ниже контакта мультибарьера и основания свалки,
- система траншей под свалкой для прокладки труб и др.

Для проектирования барьеров на полигонах ТКО необходимо выполнение нескольких условий. Во-первых, должны быть разработаны теоретические основы применения разных видов барьеров при проектировании полигонов ТКО в разных типах геологических условий (в зависимости от механического, химического состава грунтов, гидрогеологических условий, опасных процессов и др.). Барьеры для этого типа хозяйственного использования должны быть классифицированы, их применение должно быть теоретически аргументировано, особенно это касается искусственных природно-техногенных и техногенных видов барьеров, которые применяются без должного опытного обоснования.

Во-вторых, должны быть разработаны нормативные требования к применению барьеров для полигонов с учетом региональных особенностей, к ним относятся области распространения многолетнемерзлых пород, карста, горные и предгорные территории, природно-климатические зоны, болотные системы и др. Все эти условия необходимо учитывать при проектировании безопасных для геологической среды полигонов ТКО.

В качестве перспективного метода анализа проблем, выбора барьеров, поиска решений при проектировании полигонов ТКО предлагается

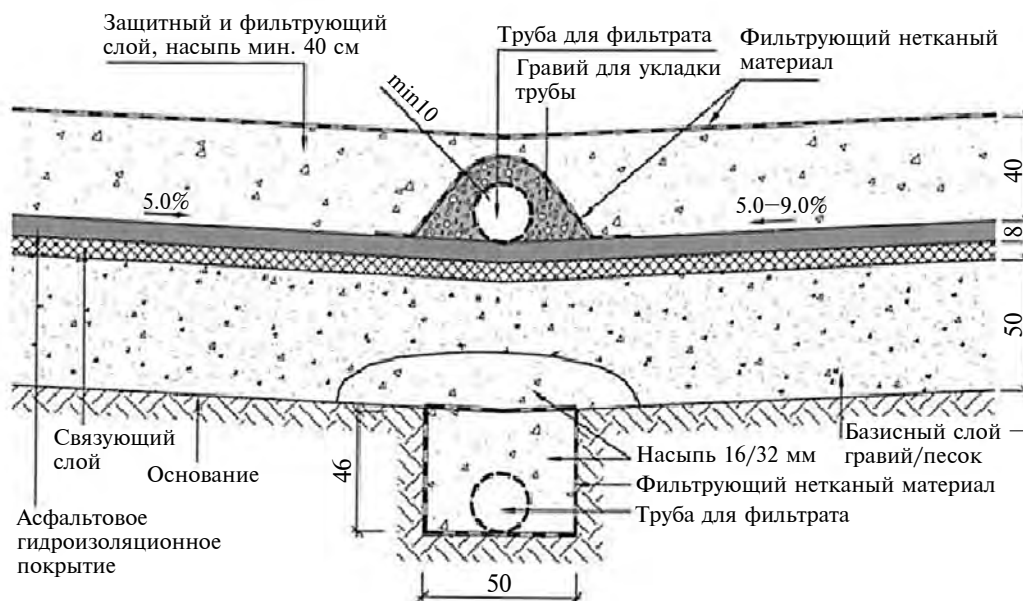


Рис. 1. Принципиальная схема гидроизоляции и уплотнения основания свалки [18].

метод “галстук-бабочка” (англ. *bow-tie analysis*) — один из наиболее наглядных методов при анализе рисков, позволяющий показать связь источников риска и последствий его реализации. В ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 [5] даны краткое описание и приблизительный алгоритм метода анализа “галстук-бабочка”<sup>1</sup>, приведены преимущества и недостатки метода. Создание мультибарьера (системы барьеров) по принципу “галстук-бабочка” сводится к комбинированию “дерева отказов” и “дерева событий” и расстановке на полученной таким образом диаграмме выделенных барьеров безопасности. Более подробный и значительно усовершенствованный метод анализа “галстук-бабочка” представлен на рис. 2.

На рис. 3 представлен принцип создания возможной системы барьеров на основе принципа “галстук-бабочка” путем анализа отрицательного воздействия на полигон ТКО и самого полигона на геологическую среду. Анализ по методу “гал-

стук-бабочка” следует строить в соответствии со следующей процедурой.

- Определение опасного события, выбранного для анализа, и его отображение в качестве центрального узла “галстука-бабочки”.
- Составление перечня причин события с помощью исследования источников риска (или опасности).
- Идентификация механизма развития опасности до критического события.
- Проведение линии, отделяющей причину от события, что позволяет сформировать левую сторону бабочки. Дополнительно могут быть идентифицированы и включены в диаграмму факторы, которые могут привести к эскалации опасного события и его последствий.
- Нанесение поперек линии вертикальных преград, соответствующих барьерам, предотвращающим нежелательные последствия. Если определены факторы, которые могут вызвать эскалацию опасного события, то дополнительно могут быть представлены барьеры, предупреждающие подобную эскалацию. Данный подход может быть использован для положительных последствий, когда преграды отражают средства управления, стимулирующие появление и развитие события.
- Идентификация в правой стороне бабочки различных последствий опасного события и проведение линий, соединяющих центральное событие с каждым возможным последствием.
- Изображение барьеров в качестве преград по направлению к последствию. Данный подход может быть использован для положительных

<sup>1</sup> Анализ “галстук-бабочка” представляет собой способ описания пути развития опасного события от причин до последствий при помощи схемы с указанием барьеров (мер управления и/или контроля) между причинами и опасными событиями, а также опасными событиями и их последствиями. Данный метод сочетает исследование причин события с помощью дерева неисправностей и анализ последствий с помощью дерева событий. Основное внимание метода “галстук-бабочка” сфокусировано на барьерах между причинами и опасными событиями, опасными событиями и последствиями. <https://sudact.ru/law/prikaz-mintruda-rossii-ot-28122021-n-926/rekomendatsii-po-vyboru-metodov-otsenki-iv/4.2/4.2.2/?ysclid=m0fbkfq0o0251806348>



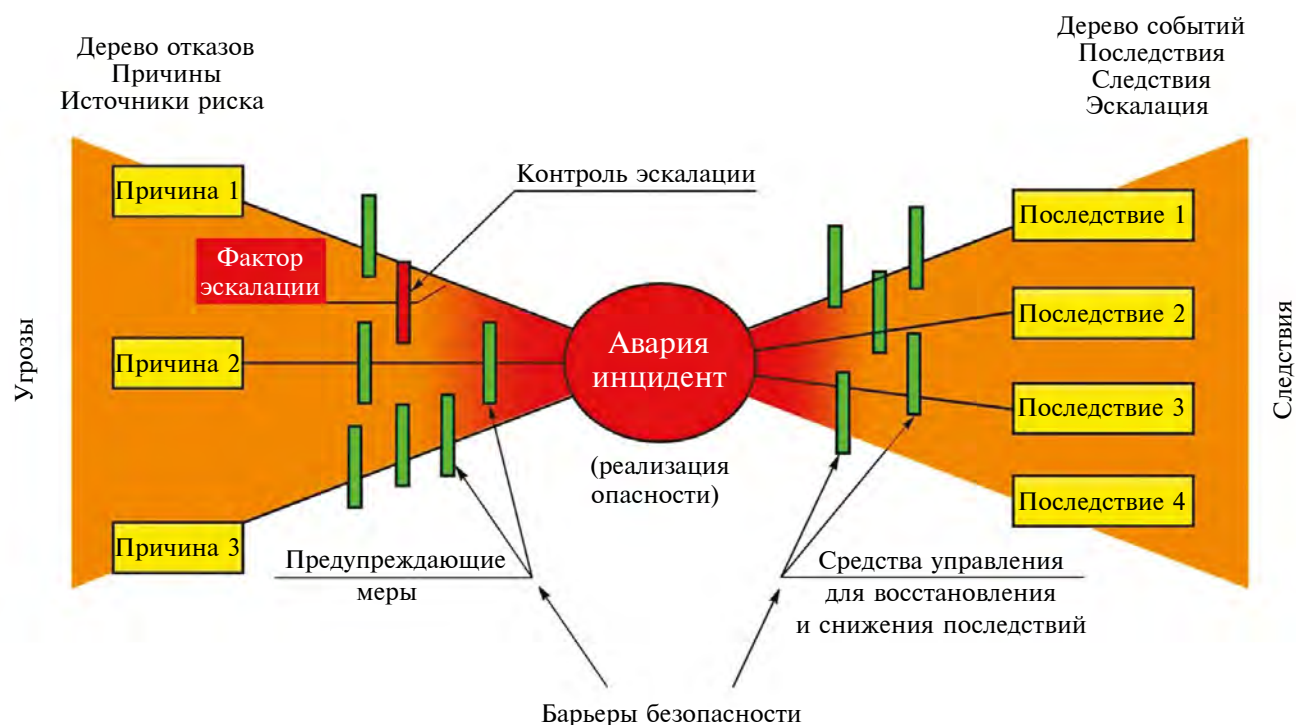


Рис. 2. Принципиальная схема метода оценки «галстук-бабочка» [5].



Рис. 3. Анализ возможного негативного воздействия окружающей среды на полигон ТКО и полигона на геологическую среду по методу «галстук-бабочка».

последствий, когда преграды отражают средства управления, обеспечивающие появление благоприятных последствий.

— Отображение под диаграммой «галстук-бабочка» вспомогательных функций управления, относящихся к средствам управления (таких как

обучение и проверки), и соединение их с соответствующим средством управления.

В диаграмме “галстук-бабочка” могут быть применены некоторые виды количественной оценки, например, в ситуации, когда пути независимы и известна вероятность конкретных последствий или результатов. Подобная количественная оценка необходима для обеспечения эффективности управления. Однако необходимо учитывать, что во многих ситуациях пути и барьеры взаимозависимы, и средства управления могут быть связаны с выбранным методом оценки, следовательно, эффективность управления является неопределенной.

## ВЫВОДЫ

Концептуально активное применения барьеров при проектировании и эксплуатации полигонов ТКО с учетом всего вышесказанного может быть достигнуто, если будет осуществлена следующая последовательность действий.

1. Современное состояние управления отходами требует принятия концептуальных решений. Одно из них — применение системы барьеров при строительстве полигонов ТКО, которая может сократить расходы и обеспечить оптимальные условия изоляции отходов.

2. Представленные выше рекомендации по классификации и устройству мультибарьеров на полигонах ТКО, обеспечивающих их безопасность для окружающей среды, разработаны с использованием опыта зарубежных стран. Необходимо внедрять методы применения барьеров безопасности в отечественную практику их проектирования.

3. Исходя из того, сколько и каких барьеров предполагается использовать при проектировании полигонов ТКО, столько необходимо разработать соответствующих рекомендаций и методик.

4. Созданные рекомендации и методики должны получить подтверждение и развитие в нормативных документах, разработка которых еще предстоит.

5. Исключительно национальным достижением российской науки является разработка учения о геохимических барьерах, позволяющего сократить затраты на обустройство полигонов ТКО, разработка которого должна быть продолжена.

6. Предлагаются варианты применения геохимических барьеров, использованных при проектировании природоохранных установок, получивших положительные результаты при проектировании полигонов ТКО.

7. Необходимы разработка и внедрение новых природных, искусственных и смешанных барьеров, направленных на нейтрализацию и локализацию

свалочных масс, особенно химической, геохимической и биогеохимической направленности.

8. Широкое использование имеющегося в настоящее время опыта нейтрализации опасных отходов металлургической и горнодобывающей промышленности может быть использовано для нейтрализации негативного воздействия полигонов ТКО на геологическую среду.

9. В основе применения указанных выше методов разработки барьеров безопасности при проектировании и строительстве полигонов ТКО должно лежать понимание особенностей геологического строения и других природных особенностей территорий, в частности зональных, геодинамических, гидрогеологических, природоохранных и др.

*Исследования проведены в ходе выполнения проекта по гранту РНФ (проект № 22-17-00045).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А., Алексеев А.П. Геохимические барьеры. М.: Логос, 2003. 143 с.
2. Бозуш А.А., Трофимов А.Н. Применение торфо-гуминовых веществ для снижения техногенного влияния отходов на окружающую среду. Химическая промышленность, 2005. №3. С. 153–158.
3. Воронкевич С.Д. Основы технической мелиорации грунтов. М.: Научный мир, 2005. 504 с.
4. ГОСТ Р 54145-2010. Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Общая методология. М.: Стандартинформ, 2012.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М.: Стандартинформ, 2012.
6. ГОСТ Р 54141-2010. Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Эталонные сценарии инцидентов. М.: Стандартинформ, 2012.
7. Грунтоведение: учеб. для студентов вузов, обучающихся по геол. специальностям. М.: Изд-во МГУ, 2005, 1023 с.
8. Жуков И.С. Барьеры безопасности: понятие, классификация, концепции. <https://www.safety.ru/sites/default/files/2017-5-49-56.pdf>
9. Лесин Ю.В. Фильтры для очистки воды из крупнокусковых отходов угледобычи // Уголь. 1986. № 2. С. 43–44.
10. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности. Приказ Ростехнадзора от 11 апр. 2016 г. № 144. Сер. 27. Вып. 16. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. 53 с.
11. Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности: приказ Ростехнадзора от 15.07.2013 г. № 306. Сер. 03. Вып. 73. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. 11 с.
12. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1966. 392 с.

13. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 367 с.
14. Фисун Н.В. Экологический потенциал эколого-гидрогеологических систем в зоне влияния Кучинского полигона твердых бытовых отходов (Московская область) // Геология и разведка. 2018. №3. С. 58–63.
15. Delvosalle C., Fievez C., Pipart A. Accidental Risk Assessment Methodology For Industries in the context of the Seveso II directive. Deliverable D.1C. WP1. Mons: Major Risk Research Centre, 2004.
16. Hollnagel E. Accident Analysis and barrier functions. Halden: Institute for Energy Technology, 1999.
17. Trbojevic V.M. Optimising hazard management by workforce engagement and supervision. Liverpool: Health and safety executive, 2008.

## SAFETY BARRIERS AND THEIR USE IN DESIGN OF MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS

V. G. Zaikanov<sup>a</sup>, I. N. Zaikanova<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: izaikanova@yandex.ru*

The article discusses the conceptual framework and the possibility of using safety barriers in the design of MSW landfills. Their existing classifications are evaluated, as well as the experience of their application at present. The article presents the safety concept based on a systematic description of various types of barriers (multi-barriers) using the example of barriers for MSW landfills. The international experience in using safety barriers, as well as their application in the design of MSW landfills in Russia, is considered. It is proposed to use on a wide scale the doctrine of geochemical barriers, which is an achievement of the Russian science. Options are considered for creating artificial geochemical barriers that have proven to be effective in neutralizing hazardous waste from the metallurgical and mining industries, allowing us to increase the effectiveness of geoenvironment protection and to reduce the cost of arranging landfills. A schematic diagram of the expected hazard assessment method, the so-called “bow tie” method is presented and the possibility of its application for assessing the risks of environmental impact on the landfill and the landfill on the geological environment is considered.

**Keywords:** *barrier, safety, landfill, solid municipal waste*

### REFERENCES

1. Alekseenko, V.A., Alekseenko, A.P. [Geochemical barriers]. Moscow, Logos Publ., 2003, 143 p. (in Russian)
2. Bogush, A.A., Trofimov, A.N. [Application of peat-humic substances to reduce the technogenic impact of waste on the environment]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 2005, no. 3, pp. 153–158. (in Russian)
3. Voronkevich, S.D. [Fundamentals of ground technological amelioration]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2005, 504 p. (in Russian)
4. GOST R 54145-2010. [Risk management. Guidelines for the application of organizational safety measures and risk assessment. General methodology]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. (in Russian)
5. GOST R ISO/IEC 31010-2011. [Risk management. Risk assessment methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. (in Russian)
6. GOST R 54141-2010. [Risk management. Guidelines for the application of organizational safety measures and risk assessment. Reference incident scenarios]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. (in Russian)
7. [Soil and rock engineering: textbook for university students studying in geological specialties]. Moscow, MGU Publ., 2005, 1023 p. (in Russian)
8. Zhukov, I.S. [Safety barriers: concept, classification, concepts] <https://www.safety.ru/sites/default/files/2017-5-49-56.pdf> (in Russian)
9. Lesin, Yu.V. [Filters for water purification from large-piece coal mining waste]. *Ugol'*, 1986, no. 2, pp. 43–44. (in Russian)
10. [Methodological principles for conducting hazard analysis and accident risk assessment at hazardous industrial facilities: Safety manual]. Order of Rostekhnadzor, dated April 11, 2016, no. 144, series 27, issue 16. Moscow, ZAO NTC PB, 2016. 53 p. (in Russian)
11. [General requirements for safety justification of a hazardous industrial facility: federal norms and rules in the field of industrial safety]. Order of Rostekhnadzor, dated July 15, 2013, no. 306, series 03, issue 73. Moscow, ZAO NTC PB, 2013. 11 p. (in Russian)
12. Perelman, A.I. [Landscape geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1966, 392 p. (in Russian)
13. Solntseva, N.P. [Oil production and geochemistry of natural landscapes]. Moscow, MGU Publ., 1998, 367 p. (in Russian)
14. Fisun, N.V. [Ecological potential of ecological hydrogeological systems in the zone of influence of the Kuchino solid municipal waste landfill (Moscow region)]. *Geologiya i razvedka*, 2018, no. 3, pp. 58–63. (in Russian)
15. Delvosalle, C., Fievez, C., Pipart, A. Accidental risk assessment methodology for industries in the context of the Seveso II directive. Deliverable D.1C. WP1. Mons, Major Risk Research Centre, 2004.
16. Hollnagel, E. Accident analysis and barrier functions. Halden, Institute for Energy Technology, 1999.
17. Trbojevic, V.M. Optimizing hazard management by workforce engagement and supervision. Liverpool, Health and safety executive, 2008.