

УДК 502/504

ПОЛИГОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ

© 2022 г. В. И. Осипов^{1,*}, И. В. Галицкая¹, В. Г. Заиканов¹

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия

*E-mail: osipov@geoenv.ru

Поступила в редакцию 09.04.2022 г.

После доработки 09.04.2022 г.

Принята к публикации 14.04.2022 г.

Рассматривается широко применяющаяся в России практика размещения твердых коммунальных отходов (ТКО) в виде свалок на открытых площадках и неровностях рельефа, приводящая к многочисленным экологическим нарушениям, загрязнению окружающей среды и снижению качества жизни. Указывается, что основная причина происходящих нарушений заключается в неконтролируемом процессе обращения с отходами и отсутствием научного подхода к развитию этой хозяйственной деятельности человека. В статье предлагается техногенно-природоподобная технология создания безопасных полигонов, основывающаяся на процессах биологического разложения с применением системы дренирования и утилизации отходящих газов и фильтрационных стоков. Показана роль геологических условий при создании безопасных полигонов. Отмечается, что применение полигонной технологии может стать основой системы обращения с ТКО в России, позволяющей обеспечить безопасность такой системы и существенно минимизировать экономические затраты обращения с отходами.

Ключевые слова: сортировка, переработка и захоронение отходов, утилизируемые и не утилизируемые отходы, технологии обезвреживания и ликвидации отходов: сжигание, пиролиз, плазменная обработка, полигонная технология

DOI: 10.31857/S0869780922030079

ВЕДЕНИЕ

Из 70 млн т твердых коммунальных отходов, ежегодно образующихся в России, 89% без какой-либо переработки и сортировки размещаются на поверхности Земли или захораниваются в верхних слоях литосферы. При этом почти 60% таких образований являются несанкционированными, а, следовательно, незаконными. Отходы накапливаются часто на отрытых площадках в виде свалок, никак незащищенных от выпадающих атмосферных осадков. Для этого используются различные неровности в рельефе: овраги, заброшенные карьеры, загрязненные производственные территории и другие неудобья.

Современная практика обращения с отходами в нашей стране носит бессистемный характер и не опирается на научно-технические достижения, что приводит к загрязнению атмосферного воздуха, почв, горных пород, подземных вод — важнейших жизнеобеспечивающих ресурсов и, как следствие, нарастанию экологических проблем, ухудшению качества окружающей среды и здоровья людей. К этому необходимо добавить, что сформированные в предыдущие годы свалки ТКО являются длительно действующими источниками загрязнения природной среды. Сказан-

ное вызывает напряжение в обществе и требование пересмотра государственной системы обращения с отходами.

Большую роль в решении этого вопроса призван сыграть национальный проект “Экология”. В программу этого проекта входит удаление к 2021 г. 191 крупной свалки и 75 наиболее опасных объектов “накопленного экологического ущерба”. Для сравнения можно сказать, что при создании в стране ФГУП “Федеральный экологический оператор” было указано 5365 объектов, требующих ликвидации. Спрашивается, как решить этот вопрос для остальных свалок?

Важнейшая проблема сложившейся в России системы накопления и размещения отходов в виде свалок — отсутствие научного подхода к ведению этой хозяйственной деятельности. Эта задача выглядит вполне решаемой, если учесть, что у нас в стране создана система захоронения в земной коре радиоактивных отходов, относящихся к более опасным и имеющим более продолжительный срок существования, чем коммунальные отходы. Опираясь на этот опыт необходимо создать теоретическую и методическую базу обращения с твердыми коммунальными отходами, которая могла бы быть основой разработки безопасной и

экономически приемлемой полигонной системы обращения с ТКО в России.

В официальных кругах считается, что выходом из этой ситуации является применение технологии сжигания, используемой в ряде западных стран. Однако в последние годы среди экологов все активнее утверждается мнение о том, что технологию сжигания нельзя считать безопасной [5–7, 14, 18, 20]. В 2017 г. эта точка зрения получила признание в Евросоюзе, где было принято решение о принципиальном отказе от технологии сжигания.

Помимо этого, необходимо учитывать, что стоимость одного мусоросжигательного завода (МСЗ) с ежегодной производительностью 650 тыс. т, предлагаемого корпорацией Hitachi Zosen Inova, составляет 35 млрд руб. Согласно проекта “Экология”, Россия намерена создать к 2024 г. систему МСЗ мощностью 37.1 млн т/год, для чего требуется возвести не менее 57 мусоросжигательных заводов. Такое количество заводов приближается к числу МСЗ, построенных, например, в Германии за последние 50 лет. Реализация такого проекта в России в ближайшее время с экономической точки зрения едва ли возможна.

Следует отметить, что имеющиеся технологии ликвидации отходов, основанные на применении сжигания или высокотемпературной обработки, не являются природоподобными. В природе отходы не сжигаются и не подвергаются высокотемпературной обработке, а происходит их медленное биоразложение и деструкция. Поэтому нами предлагается технология обращения с отходами, заключающаяся в использовании процессов разложения и деструкции биоты, происходящих в природе, дополненная техногенными процессами дренирования вредных газообразных и жидких продуктов разложения [9]. Формирующиеся при разложении продукты распада участвуют в процессах синтеза и естественного оборота вещества Земли и, в конечном итоге, ассимилируются самой биосферой.

Подобную технологию создания полигонов можно назвать *полигонной техногенно-природоподобной, в которой совмещается природный процесс разложения отходов и техногенная система удаления и утилизации накапливающихся в теле отходов вредных продуктов распада*. Сознанный на такой основе полигон через 30–50 лет существования перестает генерировать вредные продукты разложения и превращается в безопасное захоронение. Таким образом, применение полигонной технологии позволяет, не нарушая естественного процесса биоразложения, предотвращать загрязнение окружающей среды вплоть до полного прекращения процесса разложения.

Предлагаемая полигонная технология обращения с отходами включает ряд процедур таких,

как сортировка отходов, поиск места размещения полигонов, контроль процессов разложения и образования вредных продуктов разложения, обеспечение экологической безопасности полигонов.

СОРТИРОВКА ОТХОДОВ

Для создания безопасных полигонов требуется сортировка отходов до их укладки на хранение. Твердые коммунальные отходы представляют неупорядоченные смеси остатков продуктов питания, бытовых и промышленных предметов потребления, различной бытовой утвари. Подсчитано, что в ТКО могут содержаться до 1700 различных компонентов, многие из которых сохраняют полезные качества и могут быть вторичным сырьем для воспроизводства новой продукции и производства электроэнергии. Эта часть отходов должна быть выделена из общей массы отходов и направлена на переработку. Следует подчеркнуть, что обращение с отходами без сортировки делает эту систему неэффективной и относит ее к затратному производству. Поэтому одним из требований реализации полигонной технологии является сортировка отходов с выделением вторичных ресурсов.

Сортировка отходов — трудоемкий и дорогостоящий процесс. По данным западной прессы, цена сортировки составляет около 35% от общей стоимости обращения с отходами и равняется примерно 300–400 евро за 1 т отходов. По этой причине многие субъекты Российской Федерации отдают предпочтение полигонному захоронению ТКО без их сортировки и переработки, что не согласуется с мировой тенденцией.

Сортировка может осуществляться населением и носить селективный характер. Наряду с этим, она может быть механизированной с применением промышленных методов. На практике часто используется комбинированная сортировка с применением обоих подходов. Для организации селективной сортировки в жилых районах создается необходимая инфраструктура — емкости, маркированные для сбора отдельных видов отходов. При использовании промышленных комплексов мусор подвергается дроблению и сепарированию с применением специальных методов в соответствии с ресурсным предназначением. Компоненты, представляющие вторичные ресурсы, направляются на переработку, а не утилизируемая часть отходов — на полигоны, где она обезвреживается и захоранивается.

РАЗМЕЩЕНИЕ ОТХОДОВ

Общие требования к размещению отходов

Размещение отходов является ответственной процедурой обращения с ними, определяющей

шей условия накопления, переработки и дальнейшего их захоронения в геологической среде. По своему содержанию требования к размещению отходов могут быть разнообразными, начиная от санитарно-эпидемических, социальных, хозяйственно-управленческих и заканчивая природно-климатическими.

Государственное регулирование всех перечисленных требований представляется достаточно сложной проблемой. Считается, что ответственность за размещение отходов и выдачу разрешения на открытие полигонов возлагается на органы исполнительной власти, уполномоченные осуществлять федеральный государственный эпидемиологический контроль. Другие организации, например, экологической экспертизы, недропользования и т.д. не принимают участия в принятии этих решений.

Важными государственными документами, призванными регулировать размещение отходов, являются территориальные схемы обращения ТКО, функции эксперта которых призвана осуществлять публично-правовая компания «Российский экологический оператор». В постановлении Правительства РФ №430 от 22 сентября 2018 г. «О разработке, общественном обсуждении, корректировке территориальных схем в области обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, а также о требованиях к составу и содержанию таких схем» указывается в основном на необходимость сбора информации о накоплении отходов, их количестве, наличии объектов переработки и утилизации и т.д. Наряду с этим, отсутствуют требования к сведениям о геологии, геоморфологии, гидрогеологии, охраняемых природных территориях, природно-климатических и других природных особенностях т.д. Таким образом, содержащаяся в конечном документе информация о степени загруженности территории отходами и объектами обращения с ними не отражает самое главное — механизм определения мест размещения полигонов. Основной причиной этого положения является то, что территориальная привязка объектов размещения ТКО носит чисто топографический характер и не связана с особенностями природных условий, являющимися основными факторами определения риска размещения отходов в земной коре.

Необходимо отметить, что, называя полигоны «площадками», составители схем, видимо, не учитывают того, что полигоны являются объемными, достаточно сложными сооружениями, с часто меняющимися по глубине геологическим строением, гидрогеологическими условиями и другими природными условиями. По сути любой полигон с течением времени становится частью геологической среды (точнее — техносферы) и

функционирует по ее природным законам. Таким образом, территориальная схема должна содержать не только топографическую привязку места накопления отходов и объектов обращения с ними, но и характеристику природных условий, обуславливающих расположение полигонов как пространственных тел. Такая характеристика должна, по существу, представлять карту инженерно-геологического районирования территории, с выделением на ней отдельных областей или районов по степени пригодности природных условий для создания полигонов [4, 8, 10].

Инженерно-геологическая карта позволяет существенно повысить практическую ценность территориальных схем. Ее необходимо использовать как территориальную матрицу, на которую накладывается информация, предусмотренная в постановлении Правительства РФ № 1130. Только после создания такой информационной системы должна рассматриваться возможность разработки различных логических схем связи между объектами обращения с ТКО и прогнозируемыми местами расположения полигонов.

В дальнейшем, в пределах благоприятных областей, находятся наиболее перспективные площадки для размещения полигонов ТКО, на которых проводятся инженерные изыскания с целью получения показателей, необходимых для их проектирования. По данным изысканий и анализа существующих планов по социальному и хозяйственному использованию, а также кадастровых ограничений, окончательно решается вопрос, какая площадка в наибольшей мере будет отвечать требованиям создания безопасного полигона. Таким образом, инженерно-геологическое районирование, уже на первых этапах решения вопроса о размещении пунктов захоронения ТКО, позволяет оценивать принципиальную возможность принятия управленческих решений по созданию безопасного полигона с учетом его экологической и экономической эффективности.

В Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН) разработана методика инженерно-геологического районирования применительно к решению упомянутых выше задач. Методика апробирована при проведении районирования Центрального Федерального округа. ИГЭ РАН готов внедрить эту методику и осуществлять ее научное сопровождение при использовании в субъектах Федерации [4].

Геологические условия размещения полигонов

Полигоны размещаются в геологической среде — приповерхностной толще пород, состав и свойства которых являются важнейшими факторами безопасности создаваемых полигонов. В зависимости от геологических условий, полигоны

Таблица 1. Водопроницаемость различных грунтов (по Н.Н. Маслову)

Грунты	K_f , м/сут	Характеристика грунтов по водопроницаемости
Глины, монолитные скальные грунты	$< 5 \cdot 10^{-5}$	Практически непроницаемые
Суглинки, тяжелые супеси, нетрещиноватые песчаники	до $5 \cdot 10^{-3}$	Весьма слабо проницаемые
Супеси, слабо трещиноватые глинистые сланцы, песчаники, известняки	до 0.5	Слабо проницаемые
Пески тонко-, мелкозернистые, трещиноватые скальные грунты	до 5	Проницаемые
Пески среднезернистые, скальные грунты повышенной трещиноватости	до 50	Хорошо проницаемые
Галечники, гравелистые пески, сильно трещиноватые скальные грунты	≥ 50	Сильно проницаемые

могут быть заглублены частично в геологический массив (полуподземный вариант) или полностью погружены в толщу пород (подземный вариант). В первом случае дно и часть боковых стенок полигона находятся в природном массиве, а сверху перекрываются слоем грунта глинистого состава в сочетании с водонепроницаемыми пленками или другими гидроизолирующими материалами. При создании подземных вариантов дно и борта полигонов оказываются полностью в толще природного массива.

Таким образом, изолирующие свойства полигонов и их безопасность во многом определяются составом и свойствами пород, в которых они находятся. Важнейшими геологическими факторами, определяющими условия создания полигонов, являются: литологический состав пород и их свойства, гидрогеологические условия и развитие опасных природных явлений (землетрясения, наводнения, оползни, карстовые провалы и др.).

Литологический состав пород и их свойства. С литологическим составом пород связаны их изолирующие свойства и способность исполнять роль природных геологических барьеров, препятствующих распространению загрязнения. Основными критериями изолирующих свойств пород являются коэффициент фильтрации (K_f , м/сут) и удерживающая (поглощающая) способность (мг/г). В зависимости от литологического состава фильтрационные показатели могут существенно меняться (табл. 1).

Наилучшими защитными характеристиками обладают глинистые породы, поровое пространство которых представлено тонкими порами (от долей миллиметра до микронных величин), часто закрытыми и недоступными для фильтрации воды. Кроме того, на поверхности глинистых минералов формируются гидратные пленки адсорбированной воды, обладающие повышенной вязкостью и также препятствующие фильтрации [11]. Пески и, тем более гравий, свободно пропускают фильтрационный поток и практически не создают защитного барьера.

С фильтратом во вмещающие породы поступают различные загрязнители, в том числе токсичные вещества, которые, взаимодействуя с минеральными частями, удерживаются в породе.

Общее содержание загрязнителей, накапливающихся в породе, характеризуется показателем массовой концентрации загрязнителей (мг/кг):

$$C_3 = M_3 / M_{\text{ТВ}},$$

где M_3 — масса накопленных загрязнителей всех видов; $M_{\text{ТВ}}$ — масса минеральной части пород.

Физическая природа механизма удержания загрязнителей может быть различной: механической, физико-химической (адсорбционной), химической [1]. При этом загрязнители могут находиться в виде привнесенных или вновь образующихся (в результате раскристаллизации) твердых включений в порах или формирующих цемент на контактах частиц, скоплений ионов или химических образований, адсорбирующихся на активных поверхностях минералов, гелеобразных органических комплексов и жидких образований в виде эмульсий.

Помимо осадочных пород для создания полигонов могут быть использованы сцементированные породы такие, как аргиллиты и алевролиты, известняки, доломиты, мел, гипсы, ангидриты. Однако массивы этих пород характеризуются высокой трещиноватостью, содержат неоднородности структуры в результате литогенеза, выветривания и растворения. Поэтому наилучшими изоляционными свойствами обладают галоидные породы, обладающие пластичностью и подвижностью, что позволяет им восстанавливать монолитность при различных внешних воздействиях.

РАЗЛОЖЕНИЕ ОТХОДОВ И ОБРАЗОВАНИЕ ВРЕДНЫХ ПРОДУКТОВ РАСПАДА

Разложение отходов как физико-химический и микробиологический процесс

В свалочном теле полигона ТКО протекают сложные физико-химические и биохимические процессы, приводящие к разложению отходов. Один из основных компонентов свалочных тел, с которым связаны процессы разложения, — органическое вещество, поступающее с отходами,

либо образующееся в процессе их трансформации уже в свалочном теле. Дegradaция органического вещества свалочного тела проходит по различным механизмам, но основной из них — это микробиальная дegradaция в аэробных и анаэробных условиях. Биодegradaция наиболее полно осуществляется в условиях, пригодных для жизни микроорганизмов (определенный для каждой трофической группы температурный интервал, влажность, pH).

В процессе разложения отходов выделяются четыре этапа.

Первый этап (аэробная фаза) характеризуется расходом кислорода и нитрата. Присутствующие в свежих отходах сахара (углеводы) преобразуются в диоксид углерода и воду, при этом происходит снижение pH от 7.5 в отходах до 6.2 [15]. Органическое вещество на первых этапах складирования отходов подвергается аэробному окислению кислородом, который присутствует в порах свалочного тела, однако его запасы могут быть израсходованы в течение нескольких дней. Прежде всего, органическое вещество подвергается процессу гидролиза. Гидролиз входящих в состав биодegradiруемых отходов белков, жиров, и углеводов сопровождается образованием более простых соединений. Обычно аэробная фаза разложения органики длится от года до 10 лет, что определяется условиями складирования отходов и режимом рециркуляции фильтрата [17, 19]. По мере расходования кислорода активность аэробных процессов снижается, в качестве окислителей используются такие соединения, как нитраты, сульфаты, оксиды железа и марганца. В массиве начинают преобладать анаэробные условия, чему способствуют уплотнение и перекрытие отходов новыми слоями.

Второй этап — анаэробная кислая фаза (ацетогенез). Трансформация сахаров, начавшаяся в аэробных условиях, продолжается в анаэробных условиях в фазе ацетогенеза (кислотообразования). Анаэробная кислая фаза характеризуется накоплением карбоновых кислот и дальнейшим снижением pH до 5.7. Размеры микробиальных популяций возрастают при переходе от аэробных условий к анаэробным.

Третий этап — стадия активного метаногенеза — характеризуется снижением содержания карбоновых кислот, сопровождающимся резким ростом скорости образования метана. Потребление кислот микроорганизмами превышает скорость гидролиза отходов. Концентрация сульфата увеличивается до начала заметного образования метана, а затем уменьшается.

Максимальная степень разложения органического вещества достигается на четвертом этапе, когда образование метана замедляется (стадия стабильного метаногенеза). Содержание карбо-

новых кислот падает до предела обнаружения, pH среды возрастает до значений выше 8. Снижение содержания целлюлозы и медленный гидролиз оставшихся твердых отходов, которые обогащены лигнином, тормозят процесс образования метана. На этой стадии дegradaция органических веществ идет медленно, ее скорость зависит от условий окружающей среды. После резкого роста на третьем этапе скорости образования метана на четвертом этапе наблюдается ее устойчивое снижение, а также снижение концентрации карбоновых кислот.

Не более 30% органического вещества на полигонах ТКО разлагаются полностью с образованием метана. Большое количество органического углерода представлено трудно разлагаемыми веществами и надолго остается в теле свалки.

Заключительным пятым этапом является гумификация свалочных отходов. В процессе трансформации в свалке остается твердая фаза, устойчивая к микробиальной дegradaции.

Этапы ацетогенеза и активного метаногенеза могут продолжаться до 30–40 лет, а при низком содержании влаги (<40%) — до 50 лет. Процесс гумификации твердых бытовых отходов может продолжаться сотни и даже тысячи лет [2, 17].

Образование экологически опасных продуктов при разложении отходов

С экологической точки зрения основными загрязнителями природной среды на территориях размещения свалок и полигонов ТКО являются фильтрат и биогаз.

Газообразные продукты возникают в результате брожения материала ТКО и формирования биогаза (свалочного газа). Биогаз состоит на 95–98% из отопляющих газов — метана и углекислого газа. Одна тонна ТКО может служить источником образования до нескольких сотен кубометров биогаза.

При взаимодействии содержащейся в свалочном теле воды с твердыми компонентами образуются растворы, загрязненные неорганическими и органическими веществами. Поступление фильтрата в подземные и поверхностные воды приводит к их значительному загрязнению, поэтому с экологической точки зрения ТКО могут служить опасным загрязнителем воды — важнейшего жизненнообеспечивающего ресурса.

В природных условиях газовые образования и жидкие растворы, образующиеся при разложении отходов, хорошо ассимилируются биосферной средой. Однако, в условиях техногенеза природный процесс их разложения в биосфере усложняется за счет увеличения массы отходов и появления в избыточном количестве газообразных и жидких соединений. Это приводит в местах

скопления отходов к превышению экологической емкости биосферы к утилизации продуктов разложения. В результате образующиеся газообразные и жидкие продукты распространяются вокруг свалки, загрязняя окружающую среду и создавая экологические проблемы. Особую опасность представляют материалы, такие как пластик, резиновые изделия, металлы, минералы, некоторые медицинские товары, имеющие длительный период разложения: от нескольких сот и нескольких десятков тысяч лет. Их разложение идет так медленно, что можно считать, что они не ассимилируются природной средой и должны удаляться в процессе сортировки.

Очевидно, чтобы создать безопасный полигон прежде всего требуется провести сортировку и переработку компонентов, содержащих вторичные ресурсы. Всю оставшуюся массу не утилизируемых отходов следует направлять для дальнейшего разложения на полигон, оборудованный техногенными системами дренирования, сбора и утилизации вредных газообразных и жидких компонентов разложения отходов.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛИГОНОВ

В основе создания безопасного полигона лежат два основных принципа, представляющие теоретическую основу полигонной технологии. Первый принцип заключается в предотвращении контакта ТКО с элементами окружающей среды. Это достигается путем размещения полигона в геологическом массиве пород с высокими изоляционными характеристиками, создающими природные барьеры (экраны), препятствующие взаимодействию отходов с атмосферой, а также с поверхностными и подземными водами. Важно добиваться всесторонней изоляции отходов с поверхности, основания и бортов. Для этого необходимо создавать своеобразный “мешок”, в котором отходы находились бы в замкнутом пространстве.

В случае, когда массив, в котором создается полигон, сложен породами с недостаточными изоляционными показателями, обусловленными литологическим составом, трещиноватостью, структурной неоднородностью, а также их небольшой мощностью, возникает необходимость перехода на многобарьерную защиту полигона. Она заключается в том, что наряду с природным барьером, создается искусственный (техногенный) барьер из различных непроницаемых пленок, глинистых матов, песчано-цементных смесей и др. В этом случае гидроизоляционная система полигона становится двухбарьерной.

Второй принцип полигонной технологии — создание системы дренирования биогаза и за-

грязненных вод. Такие системы основываются на имеющихся методах дренирования газо- и водонасыщенных пористых тел. Важно, чтобы эти системы входили в инфраструктуру полигона и функционировали на протяжении всего срока его существования. С помощью этих устройств собираемый биогаз передается в действующую электро- или топливную систему и утилизируется, а фильтрационные растворы, в зависимости от степени их очистки, используются при решении различных хозяйственных задач.

Создаваемые таким образом полигоны, окруженные природными и техногенными барьерами, позволяют удалять и утилизировать образующийся в отходах биогенный (свалочный) газ и загрязненную воду, что является важным фактором экологической безопасности полигонной технологии обращения с ТКО.

Природные и техногенные барьеры

Барьеры на нижней границе полигона. Монолитность основания полигона и его противотранслюционная способность имеет первостепенное значение для предотвращения фильтрации из тела ТКО растворов и загрязненных подземных вод. Наиболее эффективные природные экраны образуют влажные глины монтмориллонитового, гидрослюдистого и смешаннослойного состава. Поэтому массивы, сложенные такими глинами, имеют наименьшие фильтрационные характеристики, не более 10^{-5} м/сут. Такие природные экраны толщиной от 1.5 м могут полностью обеспечить изоляцию ТКО в основании полигона (рис. 1а).

При наличии в основании полигона менее гидрофильных глинистых пород (суглинки, тяжелые супеси) с коэффициентом фильтрации 10^{-5} – 10^{-3} м/сут природный барьер можно считать эффективным при мощности толщи более 3 м. При меньшей мощности природного барьера или его большей фильтрационной способности (10^{-3} – 10^{-1} м/сут) потребуется применение комбинированного (природно-техногенного) барьера. В этом случае над природным создается техногенный барьер (рис. 1б), включающий (в основании) плотный гидроизолирующий слой, поверх которого укладывается основной гидроизоляционный слой в виде 1–2 слоев полиэтиленовой пленки или покрытия из горячего битума, асфальтобетона или других материалов, перекрытых сверху защитным слоем из песка и супеси, обработанным нефтью или горячим битумом. На техногенный барьер сверху насыпается 50–80 см дренажного материала, в котором укладывается перфорированная дренажная труба.

Барьеры на бортах полигонов. Наибольшую сложность представляет создание изоляционных барьеров в бортах полигонов, если они слагаются

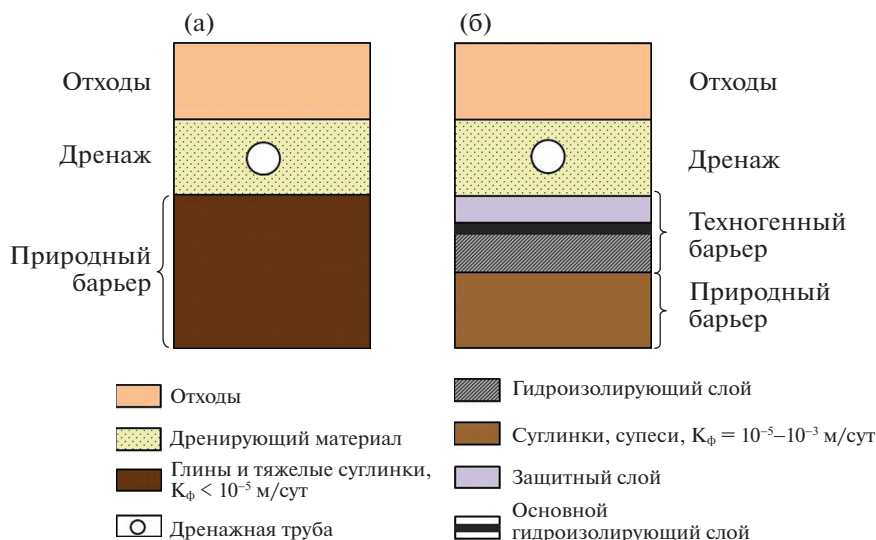


Рис. 1. Природный (а) и комбинированный природно-техногенный барьер (б) на нижней границе полигона.

породами с невысокими изоляционными свойствами. Для обеспечения всесторонней изоляции полигона необходимо создание техногенного барьера по всему периметру полигона. Создание такого барьера в разрезе, состоящем из пород различного состава, который сохранял бы свою монолитность и изолирующие свойства, — задача довольно сложная. Тем более, что боковые стенки котлована полигона могут иметь различную крутизну, в связи с чем удержание на них полиэтиленовых пленок, глинистых матов и других гидроизолирующих покрытий часто не представляется возможным. Поэтому при создании техногенных барьеров в таких условиях целесообразно применять методы технической мелиорации грунтов, позволяющих преобразовывать структуру и свойства грунтовых массивов. К числу таких методов относятся методы цементации, глинизации, горячей битумизации грунтов и др. [1, 3]. Весьма перспективным для этих целей является метод “геокомпозит” [12, 13].

Применение методов технической мелиорации заключается в том, что в массиве пород на расстоянии 3–5 м от стенки котлована по всему периметру котлована создается техногенный барьер (рис. 2). Барьер имеет вид пояса шириной 3–5 м и глубину, соответствующую глубине котлована. Вдоль всего пояса на расстоянии 3–6 м одна от другой бурятся скважины для нагнетания в породы вяжущих и цементирующих смесей, существенно изменяющих их свойства. В результате таких процедур фильтрационные свойства пород снижаются, и они начинают выполнять функцию изолирующего барьера для миграции через борта полигона газов и растворов, образующихся в теле отходов.

Барьеры при создании перекрытия полигонов.

Барьер, перекрывающий тело отходов с поверхности, возводится при заполнении полигона или при его реконструкции. Защитный поверхностный барьер является техногенным и имеет мощность не менее 1.5 м (см. рис. 2).

Перед созданием барьера поверхность отходов выравнивается и засыпается хорошо уплотняющимся материалом, на который накладывается гидроизоляционный слой, выполняющий основные защитные функции в создаваемом барьере. Для создания гидроизоляционного слоя применяются различные синтетические пленки, битумный материал, водонепроницаемые маты. Поверх гидроизоляционного слоя отсыпается рекультивационный материал, который покрывается сверху 0.15–0.30 м слоем почвы.

Системы сбора и утилизации биогаза и фильтрационных растворов

Для реализации техно-природного принципа обращения с отходами создающиеся полигоны должны включать постоянно действующую систему дренирования накапливающихся внутри полигона свальных газов и загрязненных вод. Такие системы позволяют собирать вредные продукты разложения отходов и их утилизировать, обеспечивая экологическую безопасность создаваемых полигонов.

Система дренирования и утилизации свальных газов. Система вентиляции и утилизации свальных газов включает в себя создание в теле отходов вентиляционных проходов (каналов) для накопления, транспортировки и последующей утилизации газов. Каналы представляют собой прослойки обломочного материала (крупный песок, гравий,

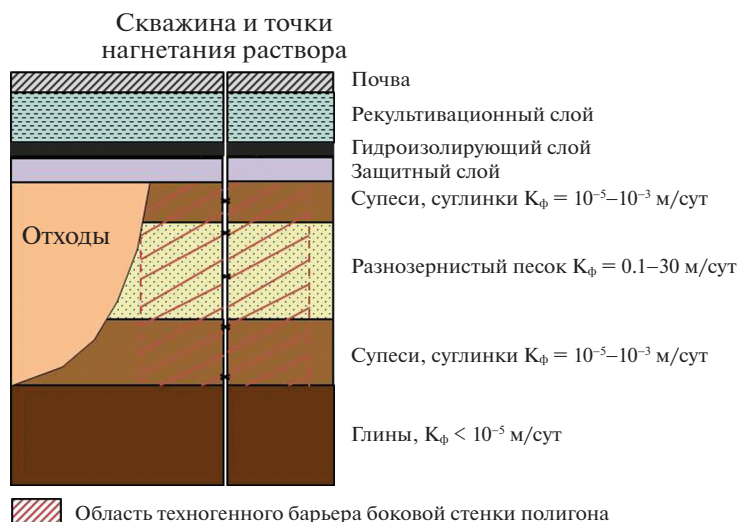


Рис. 2. Изоляция боковых стенок и поверхности полигона от внешней среды.

битый кирпич), толщиной около 0.5 м, укладываемые с расстоянием 2.5–3.0 м между ними. Вертикальная связь между вентиляционными слоями осуществляется с помощью перфорированных труб, постепенно наращиваемых при заполнении полигона. Система вентиляционных труб заканчивается магистральной трубой, по которой газ выходит на поверхность и направляется на утилизацию (рис. 3).

Система сбора и утилизации загрязненных вод. Дополнительно полигоны оборудуются системой сбора и удаления загрязненных поровых вод, образующихся при разложении и уплотнении отходов. Для этого на дне полигона создается дренажный слой мощностью не менее 0.5 м подобно слоям, предназначенных для дренирования и сбора газов. Дренажный слой и уложенные в нем трубы создают водозаборную систему полигона (см. рис. 3).

Описанные системы удаления с полигона свалочных газов и загрязненных вод могут носить нестандартный характер. Важно, чтобы эти сооружения входили в состав инфраструктуры полигона и функционировали на протяжении всего срока его существования.

Экологические требования к созданию безопасных полигонов ТКО

Рассмотренные выше принципы обращения с отходами на основе их разложения и последующей ликвидации (захоронения) позволяют сформулировать общие требования к размещению и созданию экологически безопасных полигонов. Общий вид такого полигона показан на рис. 3.

Основываясь на изложенном выше, можно сформулировать геоэкологические требования к

полигонной технологии и созданию безопасных полигонов.

1. Отходы, укладываемые на полигоне, должны быть изолированы от компонентов биосферы и не создавать угрозы загрязнения и снижения качества окружающей среды.

2. Размещение безопасных полигонов должно осуществляться на основании инженерно-геологического районирования территории с учетом литологического состава пород, гидрогеологических условий и развития опасных природных явлений.

3. Отходы должны размещаться на полигоне послойно, чередуясь со слоями песка и гравия.

4. Для обеспечения надежной изоляции отходов следует применять природные и техногенные барьеры.

5. Важнейшей задачей при создании полигона является изолирование его основания. Наиболее благоприятной ситуацией следует считать наличие природного барьера достаточной мощности, сложенного породами (например, глинистыми) с низким коэффициентом фильтрации. При отсутствии природных барьеров допускается применение многобарьерной защиты с сочетанием природных и техногенных барьеров.

6. По техническим соображениям при создании барьерной защиты на боковых сторонах полигонов следует применять методы технической мелиорации грунтов.

7. Сверху полигон должен перекрываться техногенными барьерами толщиной не менее 1.5 м, содержащими на поверхности слой почвы.

8. Полигон должен быть оборудован дренажной системой для сбора и утилизации свалочного

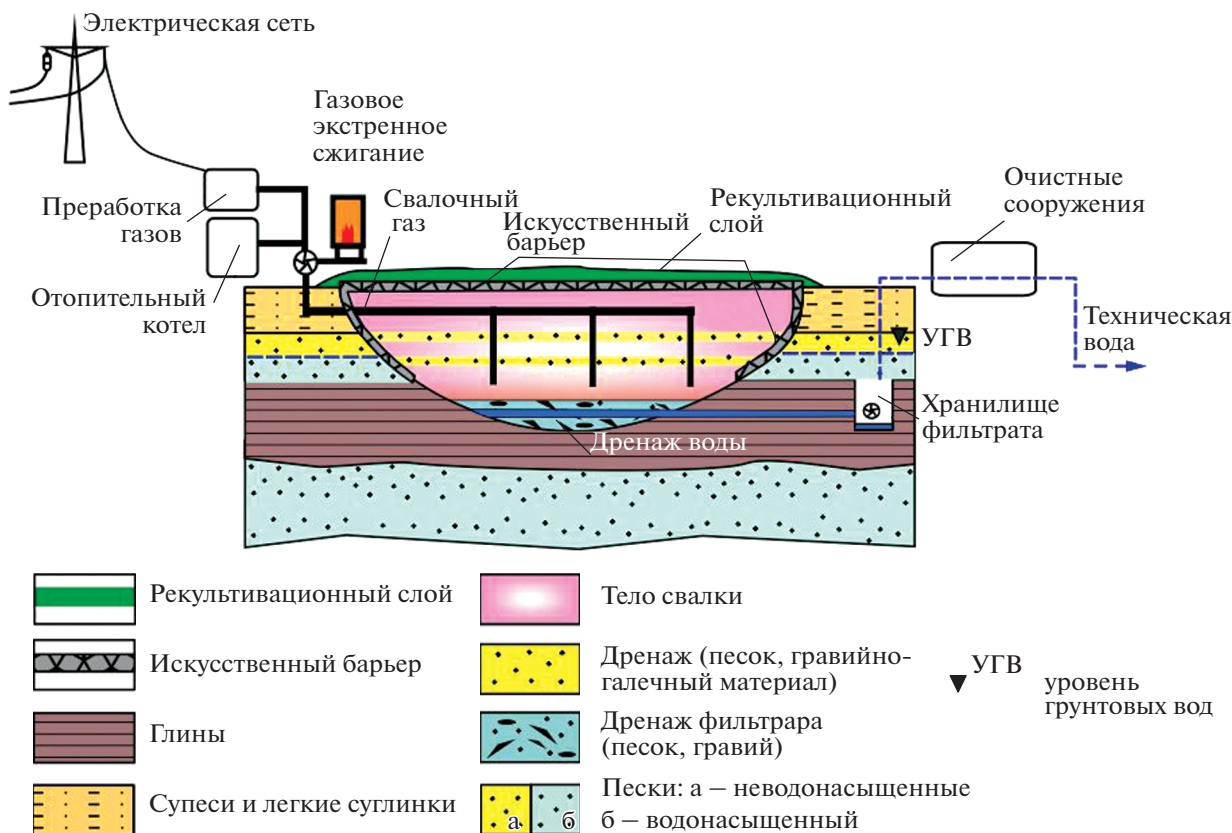


Рис. 3. Схема строения безопасного полигона в геологическом массиве.

газа и очистки образующихся инфильтрационных вод.

9. Территория полигона не должна подвергаться действию опасных природных процессов (сейсмических явлений, подтопления, наводнения, оползневые явления, карстовые и другие процессы).

Примеры создания безопасных полигонов в различных геологических условиях

Рассмотренные выше геоэкологические требования к созданию полигонов ТКО свидетельствуют о том, что к числу важнейших факторов обеспечения их безопасности относятся состав и свойства геологической среды. На основе их учета в пределах изучаемой территории обособляются участки по степени пригодности для создания безопасных полигонов. В качестве примера такого выделения можно привести районирование центральных областей Европейской части России, выполненное в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН. Изученная территория была подразделена на четыре типа участков по степени пригодности для строительства безопасных полигонов: благоприятные, условно благоприятные, условно неблагоприятные, неблаго-

приятные. Обобщенные модели таких участков приведены на рис. 4.

Участки, относящиеся к благоприятному типу по условиям размещения полигонов, характеризуются хорошими природными изолирующими свойствами: наличием в основании и кровле сооружения слабопроницаемых глинистых толщ, отсутствием контакта с подземными водами, а также геодинамических явлений и опасных природных процессов. На таких участках возможно строительство объектов ТКО с минимальными финансовыми затратами и соблюдением требований экологической безопасности и социальных условий проживания людей. Пример такого участка показан на рис. 4а. Участок полностью сложен глинистой толщей, являющейся хорошим геологическим барьером, предотвращающим загрязнение атмосферы и подземных вод. Объемы работ по инженерной защите тела отходов минимальны и заключаются в создании в его основании дренажной системы для сбора биогаза и загрязненных вод и перекрытии с поверхности (после закрытия) непроницаемым (для воды и газов) экраном, а также организации мониторинга.

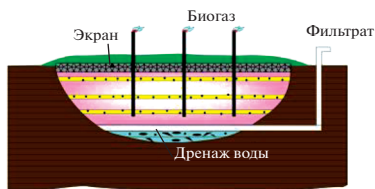
Участки, относящиеся к условно благоприятному типу, приурочены к массивам полупроницаемых и проницаемых пород, но имеющих в

(а)

(б)

Благоприятные геологические условия

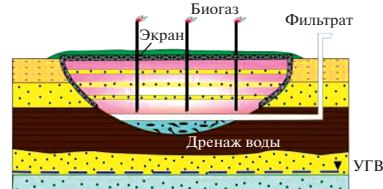
- высокие экранирующие свойства глинистой толщи в основании и бортах полигона
- отсутствие контакта с подземными водами
- отсутствие опасных природных явлений



(в)

Условно благоприятные геологические условия

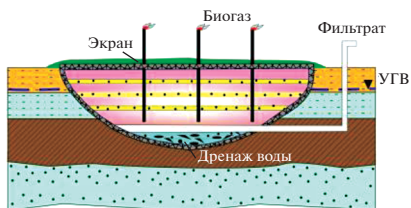
- высокие экранирующие свойства глинистой толщи в основании полигона
- наличие в бортах полигона проницаемых и полупроницаемых пород
- наличие подземных вод и их возможный контакт с телом свалки
- отсутствие опасных природных процессов



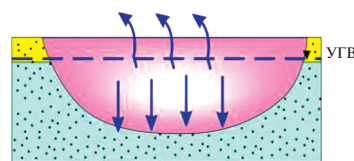
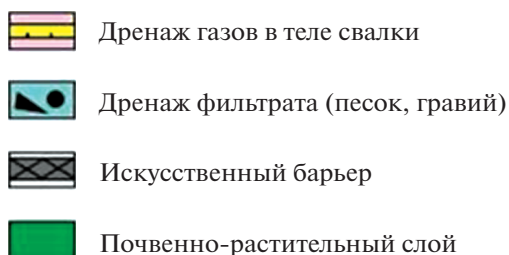
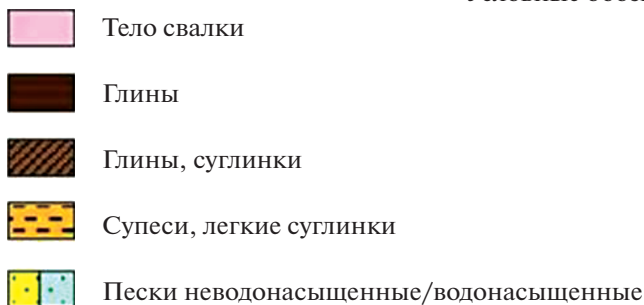
(г)

Условно неблагоприятные геологические условия

- наличие в бортах полигона полупроницаемых пород
- наличие контакта тела свалки с подземными водами
- отсутствие опасных природных процессов

**Неблагоприятные геологические условия**

- полигон размещается в легкопроницаемой песчаной толще, природные барьеры отсутствуют
- тело свалки контактирует с подземными водами
- территория участка полностью подтоплена и потенциально опасна для затопления

**Условные обозначения****Рис. 4.** Размещение отходов на участках различной степени пригодности.

основании полигона толщу глин или тяжелых суглинков, которая может служить надежным геологическим барьером (рис. 4б). Важно, что на такой площадке подземные воды, залегающие в пределах зоны влияния отходов, размещаемых на полигоне, находятся ниже его основания. Это не исключает, однако, что даже при незначительном поднятии УГВ может возникнуть контакт свалочного тела с подземными водами. Чтобы его предотвратить, необходимо возводить по периметру полигона природно-техногенный барьер с применением методов технической мелиорации грунтов, опирающийся на непроницаемый глинистый слой в его основании. Кроме того, необ-

ходима организации системы дренирования биогаза и загрязненного фильтрата воды.

Территории, относящиеся к третьему, условно непригодному типу участков, характеризуются распространением проницаемых обводненных пород (супесей, песков). В основании участков залегают полупроницаемая толща легких или средних суглинков (рис. 4в). Наличие проницаемых водонасыщенных пород в бортах полигонов и полупроницаемых отложений в основании полигона требует создания техногенных защитных барьеров по всему контуру полигона, в том числе и в его основании. Строительство полигона в таких условиях требует значительных финансовых

затрат, поэтому условно неблагоприятные территории используются для создания полигонов размещения ТКО в исключительных случаях.

К четвертому типу относятся участки непригодные для размещения отходов. К ним относятся обводненные территории, сложенные толщей легко водопроницаемых пород (крупнообломочных, трещиноватых, песчаных), в геологическом разрезе которых отсутствуют подстилающие и перекрывающие непроницаемые или полупроницаемые горизонты (рис. 4г). К ним же относятся территории интенсивного развития карстовых, суффозионных, оползневых и других опасных процессов. Инженерная подготовка таких участков требует огромных финансовых затрат на создание природно-техногенных барьеров в основании и контуре сооружения, систем для дренажа биогаза, загрязненных подземных вод и мониторинга. Поэтому размещение объектов ТКО на таких участках должно быть категорически запрещено.

Применение полигонной технологии при реабилитации “объектов накопленного ущерба”

Изложенное выше относится к созданию новых полигонов. Однако задача обращения с объектами “накопленного экологического ущерба” до настоящего времени остается нерешенной. Поэтому многие такие объекты остаются постоянными источниками загрязнения окружающей среды, а решение проблемы ликвидации старых или несанкционированных свалок в стране представляет еще более трудную задачу, чем размещение новых объектов складирования ТКО.

При решении данной проблемы предлагаемая полигонная технология обладает значительными возможностями. Для этого, как указано в проекте “Экология”, необходимо провести инвентаризацию сформированных свалок и решить: какие из них в ходе реконструкции можно довести до состояния полигона, удовлетворяющего требованиям безопасности, а какие нельзя. Очевидно, что при проведении инвентаризации знание геологических условий расположения свалок также имеет большое значение. Исходя из этого, решается вопрос об объектах ТКО пригодных для рекультивации и их сохранения на прежнем месте размещения. Свалки, отнесенные к разряду непригодных для применения полигонной технологии, должны быть закрыты, а содержащиеся в них отходы переработаны или перемещены на другие заранее подготовленные безопасные полигоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Несмотря на постоянные совершенствования различных технологий переработки ТКО, по-

лигонное размещение отходов остается неотъемлемой частью системы обращения с ними. Задача заключается в том, чтобы полигоны отвечали современным научным достижениям, соответствовали требованиям законодательных и нормативных документов и обеспечивали экологическую безопасность.

2. Предлагается новая полигонная техногенно-природоподобная технология, основанная на сочетании природного процесса разложения отходов и техногенной системы удаления и утилизации продуктов распада, накопленных в теле отходов. Созданный на этой основе полигон через 30–50 лет существования перестает генерировать вредные продукты разложения и превращается в безопасное захоронение. Применение этой технологии позволяет создавать с экологической и экономической точки зрения более эффективную систему обращения с отходами.

3. Дальнейшая разработка предлагаемой технологии и строительство на ее основе безопасных полигонов могут стать основой для развития оригинальной системы обращения с ТКО в России.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № г.р. 122022400104-2 “Техногенез и природа: геоэкологические проблемы” и частично при финансовой поддержке гранта РНФ №22-17-00045 “Научное обоснование безопасного захоронения ТКО в геологической среде”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воронкевич С.Д.* Основы технической мелиорации грунтов. М.: Научный мир, 2005. 504 с.
2. *Глушанкова И.С.* Моделирование состава фильтратных вод санитарных полигонов захоронения твердых бытовых отходов // Геоэкология. 2004. № 4. С. 334–341.
3. *Гончарова Л.В.* Основы искусственного улучшения грунтов. М.: МГУ, 1973. 376 с.
4. *Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г., Иванов П.В.* Инженерно-геологическое районирование Центрального Федерального округа России по условиям размещения предприятий и полигонов утилизации твердых бытовых отходов // Сергеевские чтения. Вып. 20. М.: РУДН, 2018. С. 74–78.
5. *Мазурин И., Понуровская В., Колотухин С.* О принципиальной непригодности технологий мусоросжигания для России. <https://regnum.ru/news/innovatio/2512284.html>
6. *Мазурин И.М., Понуровская В.В.* Сжигание мусора несовместимо с концепцией устойчивого развития // Всерос. междисциплинарный семинар-конференция геологического факультета МГУ “Система Планета Земля”, 31 января 2017. <https://regnum.ru/news/innovatio/2240524.html>
7. *Мазурин И.М., Понуровская В.В., Колотухин С.П.* Системный анализ задачи переработки твердых

- бытовых отходов // Вестник РАЕН. 2018. № 5. С. 76–84.
8. Осипов В.И. Управление твердыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // Геоэкология. 2019. № 3. С. 3–11. <https://doi.org/10.31857/S0869-7809201933-11>
 9. Осипов В.И. Что лучше – сжигать или разлагать твердые коммунальные отходы // Вестник РАН. 2021. № 8. С. 769–778. <https://doi.org/10.31857/S0869587321080089>
 10. Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Козлякова И.В. Территориальное размещение полигонов твердых коммунальных отходов // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 6. С. 567–574. <https://doi.org/10.31857/S0869587320040106>
 11. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 575 с.
 12. Осипов В.И., Филимонов С.Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом “Геокомпозит” // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2002. № 5. С. 15–21.
 13. Патент 2015248 RU. Способ создания противодиффузионной завесы в лесовом грунте. Авт.: Осипов В.И., Филимонов С.Д., Мельников Б.Н., Кайль Е.В. // Изобретения. 1994. № 12. С. 95.
 14. Рыбальченко В.С., Рыбальченко И.В. Перевод дискуссии о способах утилизации мусора из плоскости бизнес-решений в сферу научного обсуждения, как важнейшая государственная задача // Экологический вестник России. 2019. № 8. С. 28–33.
 15. Barlaz M.A., Schaefer D.M., Ham R.K. Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill // Applied and Environmental Microbiology. 1989. V. 55. № 1. P. 55–65.
 16. Bozkurt S., Moreno L., Neretnieks I. Long-term fate of organics in waste deposits and its effect on metal release // The Science of the Total Environment. 1999. V. 228. № 2–3. P. 135–152.
 17. Ehrig H.-J. Quality and quantity of sanitary landfill leachate // Waste Management and Research. 1983. V. 1. P. 53–68.
 18. Elliott P., Eaton N., Shaddick G., Carter R. Cancer incidence near municipal solid waste incinerators in Great Britain. Part 2: Histopathological and case-note review of primary liver cancer cases // British Journal of Cancer. 2000. 85 (5): 1103–6. <https://doi.org/10.1054/bjoc.1999.1046>
 19. Harmsen J. Identification of organic compounds in leachate from a waste tip // Water Research. 1983. V. 17. № 6. P. 699–705.
 20. Javier Garsia-Pereza, Pablo Fernandez-Navarro, Adela Castelloa, et al. Cancer mortality in towns in the vicinity of incinerators and installations for the recovery or disposal of hazardous waste // Environment International. 2013. V. 51. P. 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.10.003>

LANDFILL TECHNOLOGY OF WASTE MANAGEMENT

V. I. Osipov^{a, #}, I. V. Galitskaya^a, and V. G. Zaikanov^a

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

[#] *E-mail: osipov@geoenv.ru*

The paper discusses a widely used practice in Russia of municipal waste (MSW) storage in dumps on open sites and in landscape depressions, which leads to ecological disturbance, environment pollution and worsening human life quality. The uncontrolled waste management and lacking scientific approach to this kind of economic activity is proved to be the main reason for this ongoing disturbance. The technogenic and nature-like technology is proposed for creating safe landfills, based on the biological decomposition with the use of a drainage system and utilization of waste gases and filtration effluents. The role of geological conditions in the creation of safe landfills is shown. It is noted that the landfill technology may form the basis of MSW management in Russia. It will ensure the MSW management system safety and reduce significantly expenses for waste management.

Keywords: *sorting, processing and disposal of waste, recyclable and non-recyclable wastes, waste disposal technologies: incineration, pyrolysis, plasma treatment, landfill technology*

REFERENCES

1. Voronkevich, S.D. *Osnovy tekhnicheskoi melioratsii gruntov* [Fundamentals of artificial improvement of soils and rocks]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2005, 504 p. (in Russian)
2. Glushankova, I.S. *Modelirovanie sostava fil'tratsionnykh vod sanitarnykh polygonov zakhoroneniya tverdykh bytovykh otkhodov* [Modeling of waste water composition in the storage sites for solid municipal waste]. *Geoekologiya*, 2004, no. 4, pp. 334–341. (in Russian)
3. Goncharova, L.V. *Osnovy isskustvennogo uluchsheniya gruntov* [Fundamentals of artificial improvement of soils and rocks]. Moscow, MGU Publ., 1973, 376 p. (in Russian)
4. Kozliakova, I.V., Kozhevnikova, I.A., Anisimova, N.G., Ivanov, P.V. *Inzhenerno-geologicheskoe raionirovanie Tsentral'nogo Federal'nogo okruga Rossii po usloviyam*

- razmeshcheniya predpriyatii i poligonov utilizatsii tverdykh bytovykh otkhodov* [Engineering geological zoning of the Central Federal okrug in Russia by the conditions for allocation of MSW storage sites and processing facilities]. *Sergeevskie chteniya, vypusk* 20. [Proc. Sci. Conference in commemoration of academician E.M. Sergeev, issue 20]. Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 74–77. (in Russian)
5. Mazurin, I., Ponurovskaya, V., Kolotukhin, S. *O printsipial'noi neprigodnosti tekhnologii musoroszhiganiya dlya Rossii* [About the absolute unsuitability of waste incineration technique for Russia]. URL: <https://regnum.ru/news/innovatio/2512284.html> (in Russian)
 6. Mazurin, I.M., Ponurovskaya, V.V. *Szhiganie musora nesovместимо s kontseptsiei ustoichivogo razvitiya* [Garbage incineration is incompatible with the sustainable development concept]. All-Russia interdisciplinary workshop at the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State university “Planet Earth System”, January 31, 2017. URL: <https://regnum.ru/news/innovatio/2240524.html> (in Russian)
 7. Mazurin, I.M., Ponurovskaya, V.V., Kolotukhin, S.P. *Sistemnyi analiz zadachi pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov* [System analysis of the problem of processing municipal solid waste]. *Vestnik RAEN*, 2018, no. 5, pp. 76–84. (in Russian)
 8. Osipov, V.I. *Upravlenie tverdymi kommunal'nymi otkhodami kak federal'nyi ekologicheskii projekt* [Management of municipal solid waste as the Federal ecological project]. *Geoekologiya*, 2019, no. 3, pp. 3–11. (in Russian)
 9. Osipov, V.I. *Chto luchshe- szhigat' ili razlagat' tverdye kommunal'nye otkhody?* [What is better – to burn or to decompose municipal solid waste?]. *Vestnik RAN*, 2021, no. 8, pp. 769–778. (in Russian)
 10. Osipov, V.I., Mamaev, Yu.A., Kozliakova, I.V. *Territorial'noe razmeshchenie poligonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov* [Territorial allocation of municipal solid waste disposal sites]. *Vestnik RAN*, 2020, vol. 90, no. 6, pp. 567–574. (in Russian)
 11. Osipov, V.I., Sokolov, V.N. *Gliny i ikh svoistva* [Clays and their properties]. Moscow, GEOS Publ., 2013, 575 p. (in Russian)
 12. Osipov, V.I., Filimonov, S.D. *Uplotnenie i armirovanie slabyykh gruntov metodom “Geokompozit”* [Compaction and reinforcing of weak soils using the Geocomposite method]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2002, no. 5, pp. 15–21. (in Russian)
 13. Patent 2015248 RU. *Sposob sozdaniya protivofil'tratsionnoi zavesy v lessovom grunte* [The method of creating an anti-seepage curtain in loess soil]. Authors: Osipov, V.I., Filimonov, S.D., Mel'nikov, B.N., Kail' E.V. *Izobreteniya*, 1994, no. 12, p. 95. (in Russian)
 14. Rybal'chenko, V.S., Rybal'chenko I.V. *Perevod diskussii o sposobakh utilizatsii musora iz ploskosti biznes-reshenii v sferu nauchnogo obsuzhdeniya kak vazhneishaya gosudarstvennaya zadacha* [Transfer of the discussion about the garbage utilization methods from the area of business solutions to the scientific discussion as the most important state task]. *Ekologicheskii vestnik Rossii*, 2019, no. 8, pp. 28–33. (in Russian)
 15. Barlaz, M.A., Schaefer, D.M., Ham, R.K. Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill. *Applied and environmental microbiology*, 1989, vol. 55, no. 1, pp. 55–65.
 16. Bozkurt, S., Moreno, L., Neretnieks, I. Long-term fate of organics in waste deposits and its effect on metal release. *The Science of the total environment*, 1999, vol. 228, no. 2–3, pp. 135–152.
 17. Ehrig, H.-J. Quality and quantity of sanitary landfill leachate. *Waste management and research*, 1983, vol. 1, pp. 53–68.
 18. Elliott, P., Eaton, N., Shaddick, G., Carter, R. Cancer incidence near municipal solid waste incinerators in Great Britain. Part 2: Histopathological and casenote review of primary liver cancer cases. *British Journal of Cancer*, 2000, vol. 85, no. 5, pp. 1103–1106. <https://doi.org/10.1054/bjoc.1999.1046>.
 19. Harmsen, J. Identification of organic compounds in leachate from a waste tip. *Water research*, 1983, vol. 17, no. 6, pp. 699–705.
 20. Javier Garsia-Pereza, Pablo Fernandez-Navarroa, Adela Castelloa, Maria Lopez-Cima, Rebeca Ramis, Elena Boldo, Gonzalo Lopez-Abente. Cancer mortality in towns in the vicinity of incinerators and installations for the recovery or disposal of hazardous waste. *Environment International*, 2013, vol. 51, pp. 31–44.