



ОРГАНИКА НА ПОЛИГОНЕ: ВРЕДНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ И КАК ЕГО ИЗБЕЖАТЬ

*Цикл статей «Отрасль обращения с ТКО
с точки зрения профессионалов»*

Продолжение. Начало в №6'2021

В прошлом номере мы продолжили вести речь об органических (пищевых) отходах. Мы разобрались, какие процессы происходят с органикой на полигоне, а также проанализировали ее вредное воздействие на окружающую среду. Продолжим начатую тему и подробнее остановимся на том, что происходит с полигоном при размещении на нем органики с течением времени.

*И. В. Кирейчиков,
В. В. Унжаков, Д. И. Маслов,
ГК «Созвездие/Развитие»*

Коммунальные отходы на полигоне представляют собой сложную, практически однородную многофазную гетерогенную систему (техногенный свалочный грунт), состоящую из твердых (пластик, стекло, металлы, бытовые приборы и их части и т. д.), жидких (продукты гидролиза, атмосферные осадки, фильтрат)

и газообразных (продукты биохимического и химического разложения органоминеральной массы) компонентов, а также биотической (живой) составляющей. Проведя сопоставление с классическим (геологическим) определением понятия «грунт» (любые горные породы, почвы, осадки и антропогенные геологические обра-

зования, рассматриваемые как многокомпонентные динамические системы) [1], можно сделать вывод, что с содержательной и логической точек зрения полигон для размещения отходов представляет собой современный геологический объект антропогенного происхождения, состоящий из техногенного грунта.

ПОЛИГОНЫ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТХОДОВ МОЖНО ИЗУЧАТЬ КАК ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ТЕЛО.

Поэтому можно, основываясь на методах и приемах, разработанных в рамках геологических дисциплин, изучать тело полигона как отдельное геологическое тело, оказывающее влияние на экологическое состояние окружающей природной среды. Изучать любое геологическое тело (четко ограниченную часть земной коры, сложенную одной горной породой или комплексом пород одного происхождения и близкого возраста) [2] можно двумя способами: по составу (твердые, жидкие, газообразные и биологические компоненты), который будет интересен нам, и по функциональным характеристикам грунта.

Для определения особенностей (химических и физических свойств) свалочного грунта полигонов ТКО в 2006–2009 гг. было проведено обследование трех объектов размещения отходов Ленинградской области: полигонов «Новый Свет ЭКО» (Гатчинский район), «Спецавтотранс» (Тосненский район) и полигона города Кронштадт [3].

Можно сравнить формирование природно-техногенного геологического тела полигонов с формированием природной осадочной породы и выделить следующие этапы:

- образование осадочного материала (образование отходов);
- перенос осадочного материала (транспортировка к месту захоронения);
- накопление осадка (складирование на полигоне);
- преобразование осадка в осадочную горную породу (процессы биогеохимической трансформации органикоминерального вещества полигона ТКО) [4].

Помня о теме нашей статьи, обратим особое внимание на органику, размещаемую на полигонах. Состав органических компонентов в техногенных свалочных грунтах разнообразен и сложен. Принципиальное

отличие этих грунтов от природных состоит в том, что органические компоненты, как правило, находятся в неразложившемся или не полностью разложившемся состоянии. Часть из них, содержащая органику природного происхождения (пищевые отходы, древесина, макулатура и т. д.), относительно быстро разлагается и гумифицируется, а другая часть (полимеры) практически стабильна. Как мы помним, из общего объема отходов в свалочных грунтах на долю органических компонентов приходится около 50–60 %. Отметим, что именно органические вещества и их превращения в свалочных грунтах играют наиболее важную и разностороннюю роль в формировании основных свойств и характеристик эмиссионных продуктов полигонов. Изучение их состава, свойств, процессов трансформации позволит разработать методику максимально эффективного управления полигоном ТКО.

Аналитические работы проводились по методике, представленной в работах [5, 6]. Исследованиями установлено, что органическая субстанция свалочных грунтов исследованных полигонов Ленинградской области состоит из следующих веществ (табл. 1 ▶ стр. 00).

Итак, как мы уже знаем, основная часть размещаемых на полигонах ТКО отходов – это органика, а основная

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СВАЛОЧНОГО ГРУНТА (ПОЛИГОН «НОВЫЙ СВЕТ ЭКО», ГАТЧИНСКИЙ РАЙОН ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)

Наименование компонента	Содержание (% по массе)
Углеводы	65,0–69,8
Белки	8,0–9,6
Жиры (триглицериды и технические масла)	6,0–7,4
Полимеры	8,0–9,0
Прочие	8,2–9,0



Словарь

Биота (от др.-греч. βίωτή – жизнь) – исторически сложившаяся совокупность видов живых организмов, объединенных общей областью обитания (распространения).

часть этой органики – пищевые отходы. Кто же эти отходы на полигоне «ест»? Безусловно, на каждом полигоне есть своя биота – живое вещество полигона, использующее его тело как постоянную среду обитания, а органические компоненты отходов – в качестве пищи. Поедание (разрушение) органических веществ – знакомый нам процесс минерализации – заключается в разложении органических веществ с выделением углекислого и других газов, воды и минеральных солей. Минерализация в биоте полигона осуществляется исключительно интенсивно; ее совершают различные организмы, главными среди которых являются микроорганизмы.

В грунтоведении биоту условно делят на макроорганизмы (видимые невооруженным глазом) и микроорганизмы, основываясь на их роли, количественном и массовом содержании. К макроорганизмам свалочных грунтов полигонов Ленинградской



области можно отнести различные (главным образом высшие) растения, грибы и многоклеточных животных. Число видов растений, произрастающих на свалочных грунтах в умеренных широтах России, составляет порядка нескольких десятков, в основном это сорняки (мать-и-мачеха, полынь горькая и обыкновенная, горец птичий и т. д.) [7]. Роль растений в биоценозе активно функционирующего полигона невелика, но после биологической рекультивации травянистый покров становится важным звеном энергетического и вещественного обмена. Среди макроорганизмов огромная роль принадлежит представителям отдельного царства – грибам. Совместно с бактериями грибы являются редуцентами (но в несколько раз более эффективными), то есть организмами, разлагающими сложные органические соединения до более простых. В природных экосистемах почвенной подстилки около 70–90 % биомассы приходится на долю грибов (около 5 т/га). Но основным экологическим отличием почвенной биоты от полигонной является ограниченность благоприятных температурных условий существования. В связи с этим грибы в свалочном грунте распространены лишь до глубины 2,5–3 м и, кроме того, не могут существовать в зонах активного аэробного разложения с температурами до 70–80 °С [7].

Среди животных в свалочных грунтах могут обитать представители как беспозвоночной, так и позвоночной фауны, причем, в отличие от почвенных условий, свалочный грунт характеризуется большей долей пустот (более 65 %), высокой влажностью и более широким разнообразием условий в пределах единицы объема. Среди беспозвоночных широко распространены некоторые виды червей, клещей, насекомых и их личинок (мухи), и др. Из позвоночных животных, использующих свалочные грунты в качестве кормовой базы, можно выделить крыс и чаек.

Однако самое сильное влияние на состав твердых, жидких и газообразных компонентов свалочных грунтов оказывают микроорганизмы. Они обуславливают минерализацию, гумификацию и консервацию органики, разрушение и трансформацию минералов и газообразование, активно преобразуя все органические компоненты грунта. Биохимические механизмы ферментации и разло-

жения в теле полигона еще не вполне изучены. Но ясно, что их основа – это конверсия сложных органических веществ, таких как полисахариды (углеводы), липиды (жиры) и протеины (белки), в метан и углекислый газ, протекающая в бактериальной биомассе [8]. Благодаря тому что симбиотическое сообщество микроорганизмов может менять используемые им пути ферментации, оно функционирует как саморегулирующаяся система, обеспечивающая стабильность существования полигона [9].

Для количественной оценки экологических параметров функционирования полигона ТКО используется не только наблюдение за полигонами, но и методы лабораторного моделирования процессов биодegradации ТКО. Например, такие исследования проводились на базе автоматизированного лабораторного комплекса «Биореактор» (АЛК «Биореактор»), который был создан в СПбГПУ (Политех) для исследования экологически безопасного размещения ТКО. АЛК «Биореактор» (рис. 1 ▶ стр. 00, табл. 2 ▶ стр. 00) предназначен для моделирования процесса биохимического разложения (ферментации) ТКО, происходящего на полигонах и свалках.

Комплекс включает в себя климатическую комнату (термокамеру), в которой размещаются стальные контейнеры особой конструкции (биореакторы), загружаемые отходами различного механического и физико-химического состава. Биореакторы оснащены контрольно-измерительной аппаратурой, системами оборота фильтрата, отвода биогаза и отбора проб. Комплекс позволяет воспроизвести как аэробные (в поверхностном слое террикона), так и анаэробные (в более глубоких слоях) условия полигона в лабораторном масштабе, обеспечивает необходимый температурный режим, влажность и прочие параметры. Такая методика хороша тем, что сильно сокращается время, затрачиваемое на исследование, уменьшается временной масштаб: процессы биодegradации, протекающие в естественных условиях десятки лет, на лабораторной установке отображаются



К сведению

Самое сильное влияние на состав твердых, жидких и газообразных компонентов свалочных грунтов оказывают микроорганизмы.

Точки отбора проб:

1. Биогаза;
2. Субстрата;
3. Фильтрата.

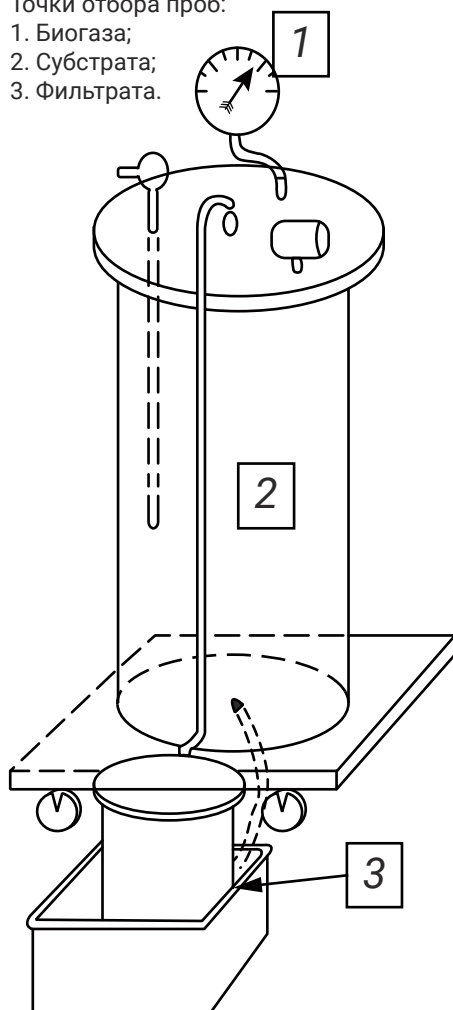


Рис. 1. АЛК «Биореактор»

за 3–6 мес. работы. Комплекс позволяет определять механический и физико-химический состав ТКО, размещаемых на полигоне, характеристики эмиссий фильтрата и свалочного газа [10].

Таким образом, в начальный период процесс разложения отходов, размещенных на полигоне, выглядит как их окисление, происходящее в верхних слоях террикона за счет кислорода воздуха, содержащегося в пустотах и проникающего из атмосферы. Затем, по мере естественного и механического, производимого в соответствии с регламентом работы полигона уплотнения отходов и изолирования их грунтом, усиливаются анаэробные процессы с образованием свалочного газа. Этот газ, по сути, – основной конечный продукт биodeградации органической составляющей отходов под воздействием микрофлоры [11].

ТАБЛИЦА 2. КРИТЕРИИ ОТБОРА ПРОБ ДЛЯ АЛК «БИОРЕАКТОР»

Критерии	Субстрат	Фильтрат	Биогаз
Кислотность (рН)	×	×	
Электропроводность	×	×	
Влажность	×		
Азот общий (N _{общ})	×	×	
Азот аммонийный (NH ₄ -N)	×	×	
Нитраты (NO ₃ -N)	×	×	
Потери при прокаливании	×		
Общий органический углерод (C _{общ})	×	×	
Карбонаты (ТКС)	×	×	
Тяжелые металлы: Pb, Cd, Zn, Cr, Ni, As, Cu, Hg	×	×	
Взвешенные вещества (SM)		×	
Химическое потребление кислорода (ХПК)		×	
Биологическое потребление кислорода (БПК ₅)		×	
Нитриты (NO ₂ -N)		×	
Фосфаты (PO ₄ ²⁻)		×	
Фосфор общий (P _{общ})		×	
Сульфаты (SO ₄ ²⁻)		×	
Метан (CH ₄)			×
Углекислый газ (CO ₂)			×
Кислород (O ₂)			×
Диоксид азота (N ₂ O)			×
Водород (H ₂)			×
Объем биогаза			×



Кроме свалочного газа образуются и другие, жидкие и твердые, но в той или иной степени растворимые в воде вещества, которые через толщу отходов и изолирующих слоев грунта выделяются в окружающую среду, загрязняя ее. Если условия складирования отходов не изменяются, то процесс их биотермического разложения стабилизируется.

При этом следует помнить, что метан и углекислый газ – главные продукты разложения мусора, но далеко не единственные. В перечень выбросов и сбросов полигонов входят сотни разнообразных летучих органических веществ. Точный состав свалочного газа и фильтрата зависит от множества факторов: от времени года, от соблюдения технологий при строительстве и эксплуатации полигона, от возраста свалки, от состава мусора, от климатической зоны, от температуры воздуха и влажности. Очень сложно изучать этот состав на работающем полигоне, на который непрерывно завозятся отходы, то есть поступает органическое вещество. Например, при обследовании подмосковного полигона «Кучино» в 2017 г. было идентифицировано около 160 органических соединений, исключая изомеры (данные проекта рекультивации полигона «Кучино» на территории городского округа Балашиха, приложение 12).

Анализ основных этапов жизненного цикла полигонов ТКО показал, что наибольшее воздействие на геоэкологическую среду происходит после закрытия и рекультивации полигона.

Вынос вредных веществ с полигона ТКО в окружающую среду со свалочным газом и фильтратом может продолжаться десятки лет до его полной адаптации к естественным условиям. Различают пять фаз процесса распада биоразлагаемых компонентов твердых отходов на полигонах (отсчет времени идет с момента укладки отходов на карту полигона, **рис. 2 ▶ стр. 00**) [12]:

1) **Аэробное разложение** (первые 20–40 дней). Во время первой фазы аэробные бактерии (бактерии, которые живут и развиваются в присутствии кислорода) расщепляют все длинные молекулярные цепочки углеводов, белков и жиров, из которых состоят пищевые отходы. Главный продукт этого процесса – углекислый газ, а также азот (количество которого постепенно снижается в течение жизни свалки). Первая фаза продолжается до тех пор, пока в мусоре остается достаточно кислорода, и она может занимать месяцы или даже дни, пока мусор относительно свеж. Содержание кислорода сильно варьируется в зависимости от степени спрессованности мусора и от глубины его захоронения.

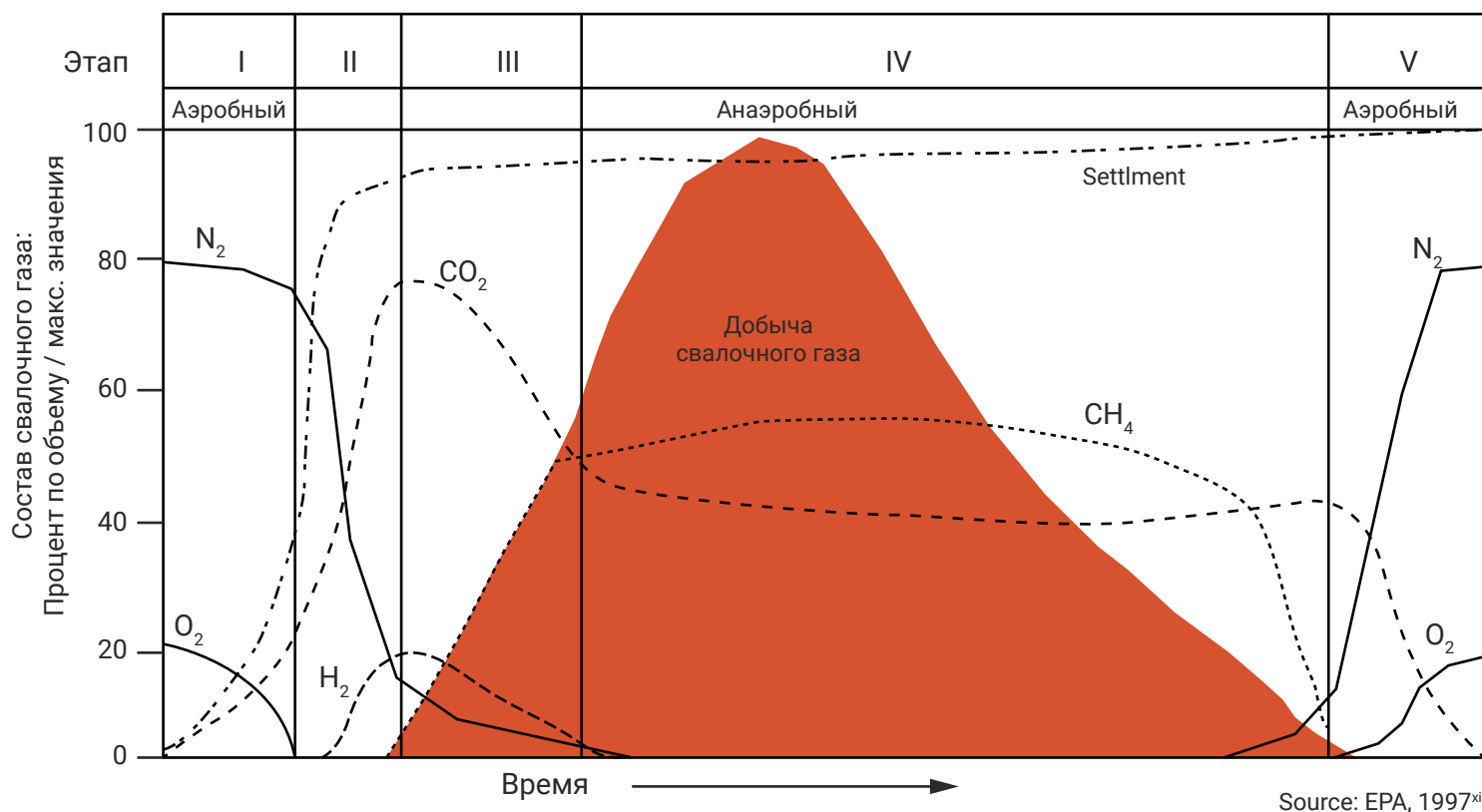


Рис. 2. Динамика объема различных газов, выделяемых отходами в зависимости от времени (по данным Агентства по охране окружающей среды, США, 1997 г.)

2) **Анаэробное разложение без выделения метана** (кислое брожение, 20–40 дней). Вторая фаза начинается, когда весь кислород в отходах уже использован. Теперь главную роль играют анаэробные бактерии (для которых кислород вреден), которые превращают вещества, созданные их аэробными коллегами, в уксусную, муравьиную и молочную кислоту, а также в спирты – этиловый и метиловый. Такие бактерии называют ацидогенами. Благодаря им на определенной глубине тела полигона среда становится кислотной. По мере того как кислоты смешиваются с влагой, высвобождаются питательные вещества, делая азот и фосфор доступными для сообщества бактерий, которые в свою очередь интенсивно вырабатывают углекислый газ и водород. Если полигон будет потревожен или в толщу отходов каким-то образом проникнет кислород, все возвращается к первой фазе.

3) **Анаэробное разложение с непостоянным выделением метана** (сמשанное брожение, до 2 лет). Третья фаза жизни полигона начинается с того, что определенные разновидности анаэробных бактерий начинают перерабатывать органические кислоты и формировать ацетаты, то есть соли и эфиры уксусной кислоты (соли – кристаллические продукты, хорошо растворимые в воде, эфиры – летучие жидкости с цветочным запахом). Этот процесс делает среду более нейтральной, что создает условия для других бактерий, которые производят метан. Эти бактерии получили название метаногенов. Таким образом, ацидогены и метаногены формируют своего рода симбиоз: ацидогены вырабатывают те вещества, которые потребляют метаногены, – углекислый газ и ацетаты, которые в больших количествах вредны для самих ацидогенов. Группа метаногенов может быть подразделена на потребителей водорода (литотрофы) и уксусной кислоты (ацетотрофы). Субстраты, содержащие серу и азот, могут вызывать рост еще двух дополнительных групп – сульфатредуцирующих бактерий и денитрификаторов.

4) **Анаэробное разложение с постоянным выделением метана** (определяется местными климатическими условиями, для различных регионов России колеблется в интервале от 10 лет на юге до 50 лет на севере, если условия складирования отходов не изменяются). Четвертая фаза, самая долгая, начинается, когда состав и уровень выделения газов на полигоне становится относительно

стабильным. На этой стадии свалочный газ содержит 40–60 % метана (по объему), а также 40–60 % углекислого газа, и до 10 % других газов. Эта фаза может продолжаться 20 и более лет, но даже через 50 лет после того, как на полигон перестали привозить отходы, он продолжает выделять свалочный газ.

5) **Затухание анаэробных процессов**, стабилизация тела полигона. ♻️



Литература

1. Грунтоведение. / Под ред. В. Т. Трофимова. – М.: Наука, 2005.
2. Геологический словарь. – М.: Недра, 1973.
3. Подлипский И. И. Эколого-геологическая характеристика полигонов бытовых отходов и разработка рекомендаций по рациональному природопользованию: Дисс. на соискание ученой степени канд. геолого-минералогич. наук. – СПб: СПбГУ, 2010.
4. Подлипский И. И. Характеристика полигонов бытовых отходов как объектов геологического исследования. // Вестник СПбГУ. – 2010. – Сер. 7. – вып. 1.
5. Методика исследования свойств твердых отходов. Академия коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова. – М.: Стройиздат, 1970.
6. Самарина В. С. Гидрогеохимия (уч. пособие). – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1977.
7. Подлипский И. И., Куриленко В. В. Полигоны бытовых отходов как современные природоохранные объекты. / Материалы X Межвузовской молодежной научной конференции «Школа экологической геологии и рационального недропользования». – СПб, 2009.
8. Мишустин Е. Н., Емцев В. Т. Микробиология. – М.: Агропромиздат, 1987.
9. Болотина И. Н. Физико-химические явления с участием биотического компонента // Теоретические основы инженерной геологии. Физико-химические основы. / Под ред. Е. М. Сергеева. – М.: Недра, 1985.
10. Негуляева Е. Ю. Оптимизация системы обращения с твердыми коммунальными отходами как фактор безопасности геоэкологической среды: Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – СПб, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2005.
11. Интервью с завкафедрой экологического мониторинга и прогнозирования РУДН Марианной Харламовой. / Кузнецов С. Химическая жизнь мусора. – Текст: электронный. // nplus1.ru, раздел «Экология и климат» (дата обращения 22.03.2018).
12. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов. – НПП «ЭКОПРОМ», АКХ им. К. Д. Памфилова, НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А. Н. Сысина, НИИ АТМОСФЕРА, НПП «ЛОГУС». – М., 2004.