

# ИНСТРУМЕНТ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ТЕЛА ПОЛИГОНА

*Guillaume Pastre, Zoe Griffiths, Javier Val, Abubacar Muhammad Tasiu,  
Erika Valeria Camacho-Dominguez, Stuart Wagland and Frederik Coulon*

Школа воды, энергии и окружающей среды при университете Крэнфилда,  
Соединенное Королевство

**Detritus** (Multidisciplinary Journal for Waste Resources and Residues)<sup>1</sup> CISA

## A DECISION SUPPORT TOOL FOR ENHANCED LANDFILL MINING

Интенсифицированное извлечение и переработка тела полигона обладает большим потенциалом для снижения негативного воздействия полигонов как на окружающую среду, так и на здоровье человека, мелиорации ценных земель и обеспечения новых источников сырьевых материалов. Однако неопределенности в отношении экономической целесообразности и экологических и социальных результатов действуют как препятствия к его широкомасштабному внедрению. В данной статье представлен инструмент поддержки решений (DST), который предназначен для снижения этих неопределенностей путем оказания помощи операторам участков в оценке экономических, экологических и социальных последствий предложенного проекта, и в то же самое время также и в оценке использования цепочки наилучших технологий и имеющихся редкоземельных элементов (РЗЭ). Этот инструмент является первым такого рода, и по мнению авторов, он используется в виде помощи для начальной оценки перед более сложным моделированием осуществимости проекта, для того чтобы увеличить масштаб внедрения практики интенсифицированного извлечения и переработки тела полигона в области устойчивого обращения с отходами.

### 1. Введение

Интенсифицированное извлечение и переработка тела полигона (ELFM) относится к процессам извлечения материалов отходов, которые ранее были депонированы на полигонах, и утилизации этих прошлых потоков отходов как материалов (превращение отходов в материалы WtM), так и энергии (превращение отходов в энергию WtE) [9].

По оценкам, в Европе имеется от 150000 до 500000 полигонов, которые относятся к периоду до появления Полигонной директивы ЕС [9]. Эти старые полигоны часто имели недостаточный уровень защиты окружающей

---

<sup>1</sup> Мультидисциплинарный рецензируемый журнал ресурсов и остатков отходов, издаваемый CISA – сертифицированной аудиторской организации по информационным системам.

среды, и вскоре потребуются дорогостоящие меры рекультивации для предотвращения вреда для здоровья человека и окружающей среды. Кроме того, из следования в прошлом линейной модели экономики “бери-делай-выбрасывай”, в не отвечающих санитарно-гигиеническим требованиям полигонах в настоящее время хранится в виде отходов большое количество ценных материалов, включая вторичное сырье (SRM), дефицитные сырьевые материалы (CRM) и редкоземельные элементы (РЗЭ), и, поэтому, они представляют собой громадные неиспользованные ресурсы [8, 10]. Такие ресурсы являются конечными, и них имеется возрастающий спрос вследствие появления новых экономических направлений [26]. В настоящее время источники этих ресурсов находятся за пределами Европы, что делает Европу уязвимой к колебаниям цен в результате глобального спроса [11].

ELFM обладает потенциалом резкого снижения затрат на рекультивацию, поставки новых ресурсов в виде SRM, CRM и РЗЭ из ЕС и рекультивации ценной земли [8, 10]. В результате этого недавно был отмечен возрастающий интерес к применению ELFM, и Европейский Парламент недавно принял решение добавить ELFM к Полигонной директиве<sup>2</sup> [4]. Однако вследствие неопределенности, относящейся к экономической целесообразности и социальным и экологическим последствиям ELFM [6, 3], эта концепция в настоящее время не выполняется в настоящее время в широком масштабе операторами. До настоящего времени не имеется инструментов, доступных для четкой оценки экономической целесообразности предложенного проекта ELFM, для оценки экологических и социальных воздействий или для идентификации лучшего использования процесса.

Целью данной статьи является презентация Инструмента применения решений (DST), в котором используется поэтапный подход к оценке наилучшего процесса ELFM, ожидаемого экономического результата и социальных экономических воздействий ELFM. DST был разработан, для того чтобы иметь дело с муниципальными твердыми отходами (MSW – в российском законодательстве ТБО) и коммерческими и промышленными отходами (C&I), и предлагает 5 смесей состава отходов в качестве параметра по умолчанию, взятых из литературного обзора. Инструмент также предоставляет пользователям вариант для предложения своего собственного состава отходов, вместе с другими предлагаемыми параметрами. Кроме того, было разработано 9 сценариев переработки, с учетом следующих технологий: промывка почвы, извлечение почвы, грохочение, измельчение, воздушная сепарация, баллистическая сепарация, магнитная сепарация вихревая сепарация (с использованием вихревых токов) и усовершенствованная термическая обработка (АТГ). Для каждого сценария было разработано и предложено следующих 3 варианта на объекте/за пределами объекта: (i) все виды обработки проводятся на объекте, (ii) сортировка проводится на объекте, но топливо, полученное из отхода (RDF) транспортируется на внешний объект для получения топлива из отходов, (iii) извлеченные отходы подвергаются грохочению на объекте, а затем транспортируются на установку для переработки отходов (WTF) для сортировки, а RDF транспортируется снова на установку WtE для утилизации (транспортирование WTF+WtE). Инструмент определяет экологические, социальные и экономические показатели для каждого сценария

---

<sup>2</sup> EURELCO – Европейский консорциум интенсифицированного извлечения и переработки теда полигона, созданный по инициативе Института интегральных систем общества Фраунгофера в рамках проектной группы по стратегиям рециклинга материалов и ресурсов. В марте 2017 г. Европейский Парламент проголосовал за интеграцию ELFM в законодательство ЕС.

с использованием мультикритериального анализа, и идентифицирует подхода наилучшего сценария с точки зрения устойчивости извлечения тела полигона. Инструмент также оценивает количество РЗЭ, имеющихся на полигоне, определенного с помощью литературного обзора.

## 2. Методы

### 2.1. Определение типичного состава отходов

Типичные фракции отходов и состав муниципальных твердых отходов (MSW) и коммерческих строительства и промышленных отходов (C&I) были определены на основе шести опубликованных конкретных исследований, проведенных в Европе (табл. 1).

Затем был использован средневзвешенный подход для определения 5 сценариев составов отходов, рассмотренных по умолчанию DST (табл. 2). Однако результаты, полученные с помощью этого подхода простой модели, следует трактовать с осторожностью, поскольку состав отходов и фракции на объекте могут значительно различаться, и может иметь место либо переоценка, либо недооценка процентного содержания некоторых фракций. DST основан на значениях, заимствованных из литературы, которые должны обновляться с течением времени по мере того, как будут доступны новые данные для лучшего отражения процессов, воздействующих на состав отходов.

### 2.2. Определение сценариев EFLM

Сценарии EFLM и технологии были основаны на критическом обзоре опубликованных статей и отраслевых ссылок. В данном случае EFLM начинается либо с выщелачивания/промывки почвы на объекте и утилизации металла или непосредственно извлечения отходов. Затем отходы сортируются с помощью различных способов, и утилизируется теплотворная фракция как RDF с помощью АТТ (таблица 3).

Для каждого сценария рассмотрено 3 варианта транспортирования (рис. 1):

1. Без транспортирования (все транспортирование происходит на объекте)
2. Транспортирование только на WtE (сортировка на объекте, транспортирование RDF на объект WtE)
3. Транспортирование на WTF и WtE (вынутый грунт просеивается только на участке, транспортирование для сортировки на WTF и транспортирование RDF на объект WtE)

### 2.3. Модель результатов

С помощью DST оцениваются воздействия сценариев выемки тела полигона на основе трех критериев: экологического, социального и экономического. Набор использованных показателей был адаптирован из набора показателей SuRF-UK<sup>3</sup> для оценки устойчивой рекультивации (табл. 4, [2]). Необходимо отметить, что в начале оценки было идентифицировано равное количество показателей (пять) в рамках каждого критерия (экологического, социального и экономического) (т.е. в общей сложности из общего

---

<sup>3</sup> Набор показателей, разработанных автономной некоммерческой организацией CL: AIRE (Великобритания) в 2008 г. для оценки показателей устойчивости применительно к работам по рекультивации загрязненных земель.

количества 15 показателей в процессе оценки устойчивости (табл. 4). Эта процедура гарантирует, что при отсутствии оценки индивидуального показателя, три основополагающих элемента получали равный вес (т.е. результат автоматически не искажался вследствие непропорционального количества показателей в одном основополагающем элементе). При более высоких уровнях оценки, когда привлечение заинтересованных сторон и процессы участия были нацелены на установление согласия в отношении относительной оценки трех компонентов или их составляющих показателей, может оказаться целесообразным применять весовые коэффициенты к отдельным показателям, чтобы отразить относительную важность различных показателей для заинтересованных сторон.

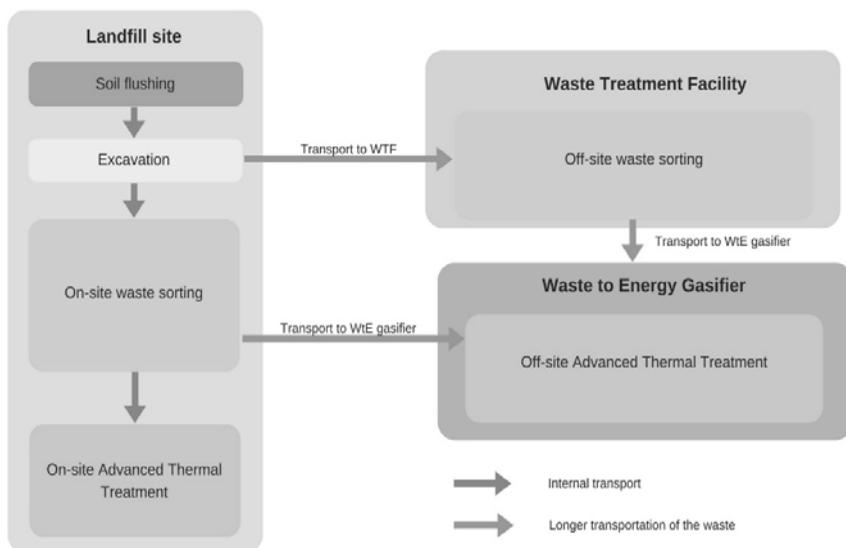


Рисунок 1. Варианты транспортирования

Пояснения к рисунку 1:

Landfill site - полигон, Soil flushing – промывка почвы, Excavation – выемка грунта, On-site waste sorting – сортировка отходов на объекте, On-site Advanced Thermal Treatment – усовершенствованная термическая обработка на объекте, Transport to WTF – транспортирование на установку для переработки отходов, Transport to WtE gasifier – транспортирование на газификатор для получения энергии из отходов, Waste Treatment Facility – установка для переработки отходов, Off-site waste sorting – сортировка отходов за пределами объекта, Waste to Energy Gasifier – газификатор для получения энергии из отходов, Off-site Advanced Thermal Treatment – усовершенствованная термическая обработка за пределами объекта, Internal transport – внутренняя транспортировка, Longer transportation of the waste – транспортировка отходов на длительные расстояния

Типичный состав отходов МВтТ и С&amp;I на полигонах

	MSW						Средний	C&I			Средний
	1	2	3	4	5	6		5	6	2	
Место	(участок4)	(участок5)	BE	BE	DE	BE		DE	BE	BE	
<10 мм тип почвы	(участок5)	Средний	44%	43%	46%	43%	46	27%	62%	70%	58%
Пластик	8%	25%	17%	12%	9%		17	33%	19%	7%	4%
Бумага/картон	8%	14%	8%	2%	5%	33%	7	-	-	1%	3%
Древесина	7%	4%	7%	9%	10%		7	-	-	2%	12%
Текстиль	3%	3%	7%	4%	3%		4	-	-	2%	2%
Стекло	-	-	-	-	2%	-	2	-	-	-	-
Камни/инертные	10%	2,5%	15%	10%	25%	10%	2	8%	8%	11%	10%
Черные металлы	4%			3%			3	2%	2%	2%	4%
Цветные металлы (P3Э)	0,8%	2%	3%	-	3%	3%	0,8	-	-	-	-
Опасные вещества	0,2%	-	-	-	-	-	0,2%	-	-	-	-
Органические отходы	3%	-	-	-	-	-	3%	-	-	-	-

Пояснения: BE – Бельгия, DE – Германия  
 1 [7], 2 – [17], 3 – [9], 4 – [3], 5 – [23], 6 – [21]

Состав отходов, использованных в данном исследовании

Фракция отходов	MSW					
	100%MSW	75% MSW, 25% C&I	50% MSW, 50% C&I	25% MSW, 75% C&I	100% C&I	
<10 мм тип почвы	45,9 %	49,5%	53,1%	56,8%	60,4%	
Пластик	17,2%	6,6%	15,9%	15,3%	14,6%	
Бумага/картон	7,1%	5,9%	4,6%	3,4%	2,3%	
Древесина	7,4%	7,4%	7,5%	7,5%	7,5%	
Текстиль	4,0%	3,5%	3,0%	2,5%	2,0%	
Стекло	1,6%	1,2%	0,8%	0,4%	0,1%	
Камни (инертные)	10,4%	10,3%	10,3%	10,2%	10,3%	
Черные металлы	2,8%	2,8%	2,9%	3,0%	3,1%	
Цветные металлы (P33)	0,8%	0,6%	0,4%	0,2%	0,0%	
Опасные вещества	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	0,0%	
Органика	2,7%	2,0%	1,3%	0,7%	0,0%	
<b>ИТОГО</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	

## Сценарии ELFM

Процесс с серией технологий										
S	Промывка почвы	-	-	-	-	Сепарация черных металлов	-	-	-	-
1	Промывка почвы	Выемка грунта	Грохочение	Дробление	Баллистическая сепарация	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация цветных металлов	АТТ (газификация)	-
2	Промывка почвы	Выемка грунта	Грохочение	Сепарация черных металлов	Дробление	Баллистическая сепарация	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация цветных металлов	АТТ (газификация)
3	Промывка почвы	Выемка грунта	Грохочение	Дробление	Воздушная сепарация	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	АТТ (газификация)	-
4	Промывка почвы	Выемка грунта	Грохочение	Сепарация Черных металлов	Дробление	Воздушная сепарация	Воздушная сепарация	Сепарация черных металлов	Сепарация цветных металлов	АТТ (газификация)
5	Промывка почвы	Выемка грунта	Грохочение	Дробление	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация цветных металлов	АТТ (газификация)
6	Выемка грунта	Грохочение	Дробление	Дробление	Сепарация черных металлов	Сепарация цветных металлов	Сепарация цветных металлов	АТТ (газификация)	-	-
7	Выемка грунта	Грохочение	Сепарация черных металлов	Дробление	Баллистическая сепарация	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация цветных металлов	АТТ (газификация)	-
8	Выемка грунта	Грохочение	Дробление	Воздушная сепарация	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	АТТ (газификация)	-	-
9	Выемка грунта	Грохочение	Сепарация черных металлов	Дробление	Воздушная сепарация	Сепарация черных металлов	Сепарация черных металлов	Сепарация цветных металлов	АТТ (газификация)	-

S – рассмотренный сценарий

Категории показателей устойчивости (адаптировано из работы [1])

Показатель	Экологический	Социальный	Экономический
1	Выбросы в воздух	Здоровье и безопасность человека	Прямые экономические затраты и выгоды
2	Условия на почве и под землей	Этика и справедливость	Косвенные экономические затраты и выгоды
3	Подземные и поверхностные воды	Окрестности и местность	Занятость и капитал занятости
4	Экология	Сообщества и привлечение сообщества	Индукцированные экономические затраты и выгоды
5	Потребление ресурсов и образование отходов	Неопределенность и очевидность	Продолжительность жизни проекта и гибкость

Оценка устойчивости работ по извлечению тела полигона проводилась с использованием поэтапного метода, начиная с простой количественной оценки, с последующим полуколичественным мультикритериальным анализом (МСА) и оценкой затрат и результатов в денежном выражении (СВА). Подход МСА был принят с использованием электронной таблицы (DST). Выгоды и воздействия осуществления вариантов LFM (извлечение и переработка тела полигона) оценивались на основе 15 категорий показателей SuRF-UK (табл. 4), а относительная важность пяти различных категорий показателей, перечисленных для каждого основополагающего фактора устойчивости, оценивалась на основе собственного суждения. Необходимо также заботиться о том, чтобы общие весовые показатели, применяемые для каждой экологической, социальной и экономической рубрики, были равными, таким образом, чтобы имело место сбалансированная оценка экологических, социальных и экономических факторов.

### 2.3.1. Оценка воздействия на окружающую среду

Критерии оценки, использованные для экологических показателей, подтожены в табл. 5.

Вследствие трудностей с поисками количественной информации о воздействии на окружающую среду выбранных технологий, их оценивали с помощью сравнения их друг с другом, а не путем предоставления им абсолютных значений. Так, например, значение -3 было присвоено технологии с максимально позитивным воздействием, а +3 – присваивали технологии с максимально негативным воздействием (табл. 6). Каждая технология также сравнивалась со сценарием не совершения никаких действий и друг с другом (подход парного сравнения).

Данная оценка фиксирует воздействие технологии в наихудшем возможном случае. Например, при оценке воздействия промывки почвы на загрязнение водных объектов авторы работы [19] упоминают экологическую проблему этой технологии, связанную с судьбой экстрагирующего вещества, которое способно загрязнять подземные воды в случае плохих условий или управления процессом. В этом отношении с учетом риска загрязнения

подземных вод, и поскольку считается, что воздействие промывки почвы на загрязнение воды является наилучшим из всех технологий, была дана оценка +3 для промывки почвы показателю загрязнения воды. Однако, если у полигона имеется изоляция, риск загрязнения воды снижается, в связи с чем оценка должна быть снижена. Поэтому при оценке воздействия применяется корректирующий фактор для учета мероприятия или технологии, которые могут смягчить негативные последствия извлечения тела полигона. Показатели, у которых имеется корректирующий фактор, включают парниковые газы, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> и загрязнение воды. Корректирующий фактор для парниковых газов и NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> описывает влияние расстояния транспортирования на воздействия сценария, и он был установлен следующим образом: +0,8, если расстояние меньше, чем 10 км ( $0,005 \times \text{расстояние, км}$ ), +0,75, если расстояние находится в диапазоне от 10 до 50 км, и 1, если расстояние больше, чем 50 км.

Таблица 5

**Оценка критериев воздействия на окружающую среду**

Критерии оценки воздействия на окружающую среду		Определение
Воздух	Парниковые газы	Выбросы парниковых газов, тесно связанные с потреблением энергии
	PM (твердые частицы)	Образование и выбросы твердых частиц в воздух
	Запах	Образование запаха
	NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub>	Образование и выбросы оксидов азота и серы в воздух
	Летучие органические соединения (ЛОС)	Образование и выбросы ЛОС в атмосферу
Вода	Загрязнение воды	Воздействие на уровни загрязнения воды
Почва	Загрязнение почвы	Воздействие на уровни загрязнения почвы
Экология	Биота	Проникновение (например, изменения уровня освещенности)
	Шум	Уровень образующегося шума, ландшафта, визуальные изменения) на окружающую биоту
Потребление ресурсов и образование отходов	Образование отходов	Количество образующихся отходов
	Утилизация металлов	Количество утилизируемого металла
	Утилизация горючих	Количество утилизируемого RDF

Таблица 6

**Шкала оценок**

Оценка	Определение
3	Высокое негативное воздействие
2	Умеренное негативное воздействие
1	Низкое негативное воздействие
0	Отсутствие воздействия
-1	Низкое положительное воздействие
-2	Умеренное положительное воздействие
-3	Высокое положительное воздействие

Корректирующий фактор для загрязнения воды зависит от наличия или отсутствия мембранной изоляции полигона; если пользователь выбирает “да”, то применяется корректирующий фактор 0,2; в противном случае применяется 1. Следует отметить, что отсутствие информации, подтверждающей чувствительность воздействия при изменении исходных данных, препятствует точному определению корректирующих факторов. Однако, для того чтобы у пользователя имелась исходная точка, использование этих корректирующих факторов, основанное на собственном суждении, предлагается для описания уменьшения воздействия, которое будет максимально реалистичным. Характеристика 9 сценариев и их 3 варианта рассчитываются с помощью добавления оценок технологий, с которыми они связаны. Так как сценарии 4 и 5 связаны с 10 технологиями, масштаб характеристик для каждого показателя находится в диапазоне от -30 до +30. Оценка -30 представляет собой максимальное полезное воздействие на показатель по сравнению со сценарием “не совершения никаких действий”, в то время как оценка +30 представляет собой максимальное негативно воздействие.

### 2.3.2. Экономическое воздействие

Вследствие трудностей с получением нынешних оценок затрат на извлечение тела полигона из опубликованных конкретных исследований, были сделаны некоторые предположения при выборе экономических показателей (табл. 7). Затраты и эффективность каждой технологии определялись из литературного обзора ([19], [3], [18], [26]), и производили умножение на количество исходных отходов для расчета количества отходов, перерабатываемых с помощью каждой технологии. В табл. 8 представлен обзор рассмотренных капитальных и эксплуатационных затрат.

Эффективность каждой рассмотренной технологии подытожена в табл. 9. Были разработаны электронные таблицы (DST) для расчета оценки дохода от извлечения тела полигона, путем учета дохода, полученного от продажи утилизированных металлов и произведенной электроэнергии, а также от использования рекультивированной земли. Цены за утилизацию материалов и произведенную электроэнергию, рассмотренные в DST, подытожены в табл. 10.

Все доходы были сложены для расчета совокупного дохода. Доходы рассчитывались следующим образом:

$RMR = \text{доход от черных металлов} + \text{доход от цветных металлов}$ , где:

$RMR = \text{доход от утилизации материалов (WtM)}$

Доход от черных металлов = количество (т) × цену (евро/т) и доход от цветных металлов = количество (т) × цену (евро/т). Цены получены из Lets-recycle.com<sup>4</sup>, 2017.

---

<sup>4</sup> Веб-сайт, основанный в Соединенном Королевстве, в котором приводятся новости и информация, относящиеся к обращению с отходами и отрасли рециклинга. Новости сообщаются ежедневно, и это один из ведущих поставщиков информации в области обращения с отходами в Соединенном Королевстве. Приводится также и ценовая информация о материалах отходов, подвергаемых рециклингу.

**Экономические показатели и связанные с ними предположения**

<b>Показатель</b>	<b>Определение</b>	<b>Предположения</b>
Чистый доход	Разница между доходами и расходами	-
Валовой доход	Доход от продажи утилизированных материалов, продажи произведенной электроэнергии и продажи рекультивированной земли	Тяжелые и опасные фракции, появляющиеся в результате сортировки и АТТ, имеют чистый доход, равный 0. При корректировке на инфляцию использовались уровни инфляции с 2005 г. по декабрь 2016 г. ([17], [5]). Все полученные валюты конвертировались в евро. Коэффициент пересчета для фунта стерлинга в евро и доллара в евро составлял 1,17 и 0,9416, соответственно.
Затраты	Эксплуатационные и капитальные затраты на промывку почвы, извлечение грунта, сепарацию, методы сортировки и АТТ. Учитываются также транспортные затраты	При корректировке на инфляцию использовались уровни инфляции с 2005 г. по декабрь 2016 г. ([17], [5]). Все полученные валюты конвертировались в евро. Коэффициент пересчета для фунта стерлинга в евро и доллара в евро составлял 1,17 и 0,9416, соответственно.

**Оценки затрат с использованием DST (электронной таблицы)**

<b>Фракция отходов</b>	<b>100% MSW</b>	<b>75% MSW, 25% C&amp;I</b>	<b>50% MSW, 50% C&amp;I</b>	<b>25%MSW, 75% C&amp;I</b>
Промывка почвы	-	10	228	19
Извлечение грунта	2,10 евро/т	-	3,94	3
Визуальная сортировка	-	-	0,8	18
Баллистическая сепарация	150000	-	6,80	24
Грохочение	20000	-	2,91	18
Дробление	325000	-	9,71	18
Воздушная сепарация	292500	-	14,56	18
Сепарация черных металлов	45000	-	2,91	18
Сепарация цветных металлов	65000	-	5,83	18
Транспортирование	-	-	0,2	20
АТТ (газификация)	50 евро/т	-	67	3

## Значения эффективности, используемые для DST для каждой рассмотренной технологии

% материала, направляемого на следующие процессы	< 10 мм тип почвы	Пластик	Бумага/картон	Древесина	Текстиль	Стекло	Камни	Черные металлы	Цветные металлы	Опасные компоненты	Органические отходы	Сноски
Извлечение грунта	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
Баллистическая сепарация	5%	50%	20%	60%	20%	50%	35%	95%	75%	80%	50%	[26]
Мелкая фракция	90%	10%	10%	20%	5%	50%	60%	3%	20%	15%	50%	[26]
Горячая фракция	5%	40%	70%	20%	75%	50%	5%	2%	5%	5%	0%	[26]
Грохочение	10%	80%	70%	75%	90%	10%	90%	50%	40%	15%	5%	[26]
Дробление	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	Предположение
Воздушная сепарация	1%	99%	99%	1%	99%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	<a href="http://www.ni-hot.co.uk/products/drum-separators/">http://www.ni-hot.co.uk/products/drum-separators/</a>
Сепарация черных металлов	98%	95%	100%	98%	99%	100%	98%	20%	100%	0%	100%	[26]
Сепарация цветных металлов	97%	98%	98%	98%	99%	100%	100%	97%	20%	100%	100%	[26]
Сепарация черных металлов (мелкой фракции)	98%	95%	100%	98%	99%	100%	98%	20%	100%	100%	100%	Предположение
Промывка почвы	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	70%	70%	100%	100%	Предположение

Доходы от утилизации металлов и энергии и от рекультивации земли

Доход	Наихудший случай	Наилучший случай	Ссылка
Генерация электроэнергии	80 евро/МВтч	135 евро/МВтч	<a href="http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Electricity_prices_for_household_consumers_second_half_2015">http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Electricity_prices_for_household_consumers_second_half_2015</a>
Утилизация черных металлов	130 евро/т	142 евро/т	Цены за scrap <a href="http://www.letsrecycle.com/prices/metals">www.letsrecycle.com/prices/metals</a>
	1827 евро/т	1913 евро/т	Цены за scrap <a href="http://www.letsrecycle.com/prices/metals">www.letsrecycle.com/prices/metals</a>
Рекультивация земли: Под жилую застройку Для промышленности Для сельского хозяйства Для природопользования		155 евро 80 евро 10 евро 3 евро	[3]

$RER = \text{количество RDF (т)} \times \text{теплотворную способность (МДж/т)} \times \text{эффективность АТГ} \times \text{коэффициент конверсии (МВтч/МДж)} \times \text{цену за электроэнергию (евро/МВтч)}$ , где:

$RER$  – доход от утилизации энергии (WtE)

Цены получены из: <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/>

$RLR$  – площадь земли (га)  $\times$  стоимость земли (евро/га), где:

$RLR$  – доход от рекультивации земли. Стоимость земли получена из [3] для 4 различных видов землепользования: под жилую застройку, для промышленных целей, для сельского хозяйства и природопользования. Землепользование для большей площади полигона имеет цену 0 евро/га, но может изменяться землепользователями в случае учета предотвращенных затрат.

### 2.3.3. Социальная оценка

Использованные социальные показатели были адаптированы из набора индикаторов SuRF-UK для оценки устойчивой рекультивации [2] и подытожены в табл. 4. Краткое разъяснение того, как они были учтены в инструменте для поддержки принятия решений, приводится ниже.

- Участие в делах общества: оценка участия сообщества и принятия проекта. Это участие зависит от создаваемых последствий, которые оказывают непосредственное воздействие на жизнь сообщества.

- Здоровье человека: оценка воздействий на здоровье рабочих на объекте и членов сообщества, вызываемых появлением ЛОС, шума, запаха, пыли и биоаэрозолей.

- Этические соображения: оценка возможности появления этических споров. Например, загрязнение подземных вод, которые являются источником питьевого водоснабжения.

- Неудобства в окрестностях: оценка появления факторов неудобств (например, шума, светового загрязнения, запахов, мусора и органических веществ за пределами объекта).

- Доказательства устойчивости и уровень неопределенности: оценка степени устойчивости окружающей среды, а также уровней неопределенности, связанных с результатами.

Таблица 11

#### Значения коэффициента коррекции, используемого для здоровья человека и неудобств в окрестностях

Количество жителей, проживающих на расстоянии менее 1 км от границ объекта	Значения коэффициента коррекции
<200	0,1
200-400	0,2
400-600	0,4
600-800	0,6
800-1000	0,8
>1000	1

Социальная эффективность сценариев рассчитывается таким же образом, что и экологическая эффективность, описанная выше. Был также применен коэффициент коррекции для показателей здоровья человека и неудобств в окрестностях для учета влияния количества проживающих вблизи жителей. С учетом отсутствия подтверждающих данных коэффициент коррекции был рассчитан на основе собственного суждения (табл. 11).

## 2.4. Расчет РЗЭ

Оценочные значения РЗЭ были рассчитаны с использованием линейной регрессии между % MSW и количеством РЗЭ. Данные были заимствованы из работ [16] и [8] (табл. 12). Значения РЗЭ были рассчитаны путем умножения количества РЗЭ с рыночной ценой в период с января по март 2017 г. ([14], [15]).

Таблица 12

Оценки количества РЗЭ на полигонах

	Концентрация мг/кг	[8] 75% MSW, 25% C&I	[14] 57,2% MSW, 42,8% C&I
РЗЭ	Sc	3,46	0,96
	Y	6,42	7,85
	La	9,36	9
	Ce	21,38	20,5
	Pr	2,39	1,9
	Nd	11,75	7,26
	Sm	2,06	
	Eu	0,59	
	Gd	2,07	0,75
	Tb	0,24	
	Dy	1,44	
	Ho	0,21	
	Er	0,65	
	Tm	0,08	
Yb	0,52		
Lu	0,07		
Металлы платиновой группы	Pt	0,02	0,059
	Pd	0,77	0,5
	Ru	21,90	0,0005
Другие дефицитные элементы	Li	0,10	9
	In	7,71	0,29
	Sb	14,14	
	Co	1076,00	
Прочие	Cu	1076	2230
	Ag	2,26	5,3
	Au	0,18	0,4
	Al	17274	17000

### 3. Результаты модели и пользовательский интерфейс

DST был создан в Microsoft Excel<sup>5</sup>. В следующих разделах дается разъяснение интерфейса инструментальных средств и приводятся результаты модели.

#### 3.1. Исходная информация сценария

Таблица с исходной информацией сценария представлена на рис. 2. Эта таблица используется для введения исходных параметров. У пользователей имеется возможность выбора либо значений по умолчанию для состава отходов, ценности рекультивированной земли, либо введения своих собственных значений (обычный состав). Пользователь может также выбрать расчет наилучшего сценария, рассчитанного в соответствии с наилучшими финансовыми, экологическими или социальными результатами.

Пояснения к рисунку 2: Input – исходные данные, Default value – значение по умолчанию, Custom value – обычное значение, Units - единицы, Total amount of wastes in landfill – общее количество отходов на полигоне, tonnes - тонн, ha - гектар, Waste composition (% of weight) – состав отходов ( в % вес.), MSW - ТБО, Custom composition – обычный состав, w/w – вес. %, <10 mm soil type – тип почвы <10 мм, Plastic - пластик, Paper/cardboard – бумага/картон, Wood - древесина, Textile - текстиль, Glass - стекло, Stones, inert – камни, инертные, Ferrous metals – черные металлы, Non-ferrous metals (REEs) – цветные металлы (РЗЭ), Hazardous – опасные компоненты, Organ waste – органические отходы, Current sum – текущая сумма, Is there a liner in the landfill – имеется ли изоляция на полигоне, No - нет, Number of residents within 1 km radius – количество жителей в радиусе 1 км, PE – постоянно проживающих, Value of remediated land – стоимость рекультивированной земли, €/m<sup>2</sup> – евро/м<sup>2</sup>, Residential – для жилой застройки, Industrial – для промышленных целей, Agricultural – для сельского хозяйства, Nature – для природопользования, Landfill - полигон, Distance from the landfill to Waste treatment facility - расстояние от полигона до установки для переработки отходов, Distance from waste treatment facility to waste to energy plant – расстояние от установки до переработки отходов до установки для получения энергии из отходов, Distance from the landfill to waste to energy plant – расстояние от полигона до установки для получения энергии из отходов, Criteria for selection of the best scenario – критерии для выбора наилучшего сценария, km - км, Show met the result! – демонстрация результата

#### 3.2. Результаты наилучшего сценария и сравнение сценариев

Таблица результатов наилучшего сценария отображает результаты экономической, экологической и социальной оценки для наилучшего сценария в соответствии с критериями, выбранными пользователем (рис. 3). Для экологической и социальной оценки показатели воздействия также отображены в виде гистограммы, где базовый вариант относится к сценарию “не совершения никаких действий” (рис. 4).

---

<sup>5</sup> Программа для работы с электронными таблицами, разработанная корпорацией Microsoft для операционных систем Microsoft Windows, Windows NT и Mac OS, а также Android, IOS и Windows Phone

Input	Default value	Custom value	Units
Total amount of waste in landfill:	100,000		tonnes
Total landfill area:	10		ha
<b>Waste Composition (% of weight) :</b>	<b>100% MSW</b>	<b>Custom composition</b>	
<10mm soil type	45.89%		w/w
Plastic	17.22%		w/w
Paper/Cardboard	7.43%		w/w
Wood	7.38%		w/w
Textile	3.97%		w/w
Glass	1.59%		w/w
Stones, inert	10.38%		w/w
Ferrous metals	2.76%		w/w
Non-ferrous metals (REEs)	0.79%		w/w
Hazardous	0.20%		w/w
Organic waste	2.68%		w/w
Current sum :		0%	w/w
Is there a liner in the landfill?	No		PE
Number of residents within 1 km radius	> 1000		
<b>Value of remediated land:</b>			
Residential	155		€/m <sup>2</sup>
Industrial	80		€/m <sup>2</sup>
Agricultural	10		€/m <sup>2</sup>
Nature	3		€/m <sup>2</sup>
Landfill	0		€/m <sup>2</sup>
Distance from the landfill to Waste treatment facility	50		km
Distance from waste treatment facility to waste to en	80		km
Distance from the landfill to Waste to Energy plant (g	10		km
Criteria for selection of the best scenario	The highest best case net income		

Show methereults!

Рисунок 2. Отображение исходной информации сценария

ECONOMIC ASSESSMENT											
NET INCOME	Worst case	Best case	Unit	REVENUES	Worst case	Best case	Unit	COSTS	Worst case	Best case	Unit
	-3 778 824	17 212 579	€		Revenue from WtM	3 262 716	20 626 730		€	Revenue from WtM	7 041 540
			Amount of ferrous metals	602 092	636 927	€	Amount of ferrous metals	1 928 635	1 928 635	€	
			Amount of non-ferrous metals	1 094	1 094	t	Amount of non-ferrous metals	1 485 515	1 485 515	€	
			Revenue ferrous	252	252	t	Revenue ferrous	45 180		€	
			Revenue non-ferrous	142 353	155 372	€	Revenue non-ferrous	1 373 032		€	
			Revenue from WtE	459 739	481 555	€	Revenue from WtE	1 137 788		€	
			Amount of RDF	2 660 624	4 489 803	€	Amount of RDF	1 116 569		€	
			Revenue from land	22 172	22 172	t	Revenue from land				
			Residential	15 500 000	15 500 000	€	Residential				
			Industrial	8 000 000	8 000 000	€	Industrial				
			Agricultural	1 000 000	1 000 000	€	Agricultural				
			Nature	300 000	300 000	€	Nature				
			Landfill	0	0	€	Landfill				

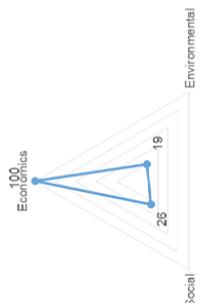


Рисунок 3. Результаты наилучшего сценария

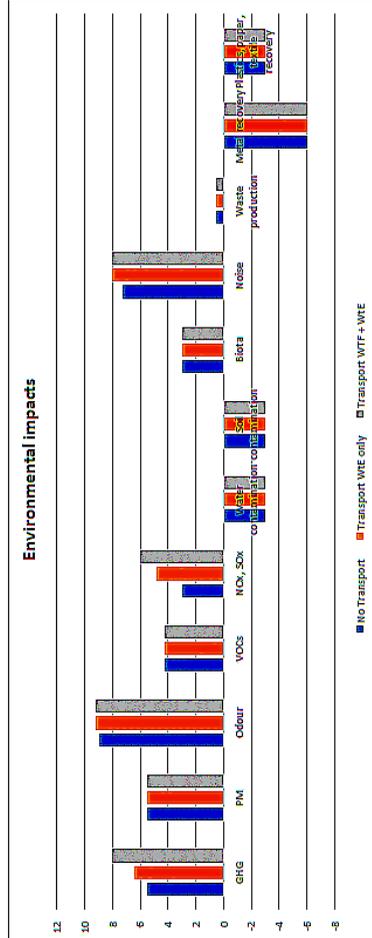
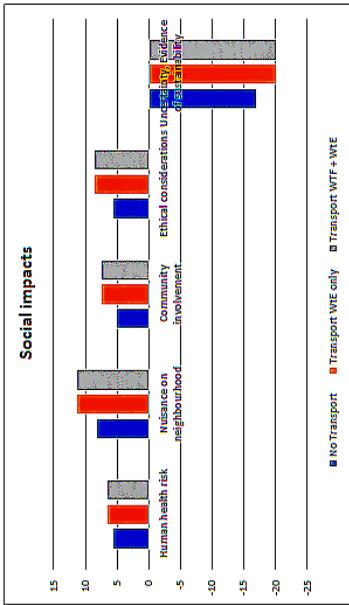


Рисунок 4. Гистограмма, демонстрирующая социальные и экологические воздействия

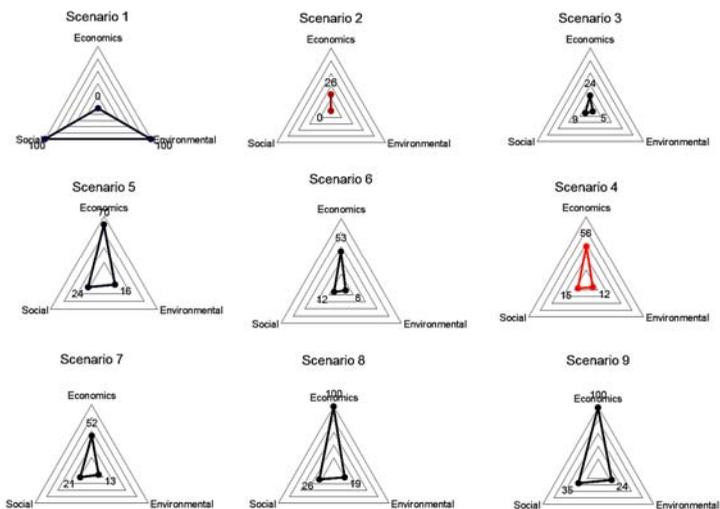


Рисунок 5. Лепестковые диаграммы для сравнения сценариев

Пояснения к рисунку 3: NET INCOME – чистый доход, Worst case – наихудший случай, Best case – наилучший случай, Units - единицы, Revenues - доходы, Economic assessment – экономическая оценка, Costs - затраты, Social - социальные, Economics - экономические, Environmental - экологические, Revenue from MSW – доход от ТБО, Amount of ferrous metals – количество черных металлов, Amount of non-ferrous metals – количество цветных металлов, Revenue ferrous – доход от черных металлов, Revenue non-ferrous – доход от цветных металлов, Revenue from WtE – доход от получения энергии из отходов, Amount of RDF – количество топлива из отходов, Revenue from land – доход от земли, Residential – жилая застройка, Industrial – промышленное использование, Agricultural – сельскохозяйственное использование, Nature - природопользование, Landfill - полигон, OPEX excavation & sorting – эксплуатационные затраты для установки получения энергии из отходов, OPEX WtE – эксплуатационные затраты на транспорт, WtE only – только установка для получения энергии из отходов, WTF + WtE – установка для переработки отходов + установка для получения энергии из отходов, CAPEX excavation & sorting – капитальные затраты на извлечение грунта и сортировку, CAPEX WtE – капитальные затраты для установки получения энергии из отходов

Пояснения к рисунку 4: Social impacts – социальные воздействия, Human health risk – риск для здоровья человека, Nuisance on neighborhood – неудобства в окрестностях, Ethical consideration Uncertainty, Evidence of sustainability – этические соображения – неопределенность, доказательство устойчивости, No Transport- нет транспортирования, Transport WtE only – транспортирование только на установку для получения энергии из отходов, Transport WTF+WtE – транспортирование на установку для переработки отходов + на установку для получения энергии из отходов, Environmental impacts – экологические воздействия, GHG – парниковые газы, PM – твердые частицы, Odor - запахи, VOCs- летучие органические соединения, NOx, SOx – оксиды азота и серы, Water contamination – загрязнение водных объектов, Soil contamination – загрязнение почвы, Biota - биота, Noise - шум, Waste production – образование отходов, Metal recovery Plastics, paper – утилизация металлов, пластика, бумаги

Пояснения к рисунку 5: Scenario - сценарий, Economics – экономическая (устойчивость), Social - социальная, Environmental – экологическая

В таблице для сравнения сценариев сравниваются показатели всех 9 сценариев EFLM друг с другом. Это сравнение отражается визуально с помощью лепестковых диаграмм, создаваемых путем установления наилучшего результата в каждой категории (экономической, экологической и социальной) как нуля и наилучшего результата в каждой категории как 100; каждый сценарий отображается вдоль этой шкалы от 0 до 100 (наихудший – наилучший) путем регрессии шкалы от фактической величины, пример для иллюстрации приведен на рис. 5.

#### 4. Испытания и подтверждение модели

Для проверки инструмента поддержки принятия решений и для более глубокого понимания того, какие факторы воздействуют на осуществимость проектов извлечения и переработки тела полигона, было проведено моделирование 10 сценариев. Особенности каждого сценария можно увидеть в табл. 13. Во всех 10 случаях использовали одинаковое количество отходов и одинаковую площадь полигона. Было рассмотрено 5 вариантов состава отходов для понимания того, наличие каких материалов отходов в теле полигона делает процедуру извлечения и переработки тела полигона доходной. Кроме того, для каждого типа состава отходов изменялись такие параметры как наличие геомембраны, количество жителей и расстояние до объектов для получения энергии из отходов и сортировки отходов, для того чтобы понять изменения социальных и экологических показателей. С учетом того, что единственным параметром, воздействующим на количество РЗЭ в теле полигона, является их процентное содержание в MSW, расчеты делались только для случаев 1, 3, 5, 7 и 9. В данном иллюстративном примере критерием для выбора наилучшего сценария был «наилучший случай с наибольшим чистым доходом».

Экономические результаты показаны в табл. 14. Для всех различных типов использованных полигонов наилучший из предложенных подходов процесса представлен в Сценарии 8. Этот сценарий дает возможность получить наибольший чистый доход вследствие высокой эффективности (99%) процесса воздушной сепарации. Такая высокая эффективность позволяет увеличить количество сортированных пластиков, текстиля и древесины, тем самым способствуя большему количеству произведенной и проданной электроэнергии. Хотя утилизация черных металлов из мелкой фракции приводит к росту утилизируемого количества этих материалов, избыточные затраты на этот процесс перевешивают полученный доход, таким образом вызывая снижение чистого дохода всего процесса извлечения тела полигона. Из представленных результатов моделирования можно вывести, что чем выше % MSW на полигоне, тем выше чистый доход. Это связано с тем фактом, что чем выше % MSW, тем выше количество цветных металлов, бумаги/картона и текстиля.

Социальные воздействия, такие как риск для здоровья человека и неудобства в окрестностях, возрастают с ростом количества людей, проживающих на территории, окружающей полигон. Наличие геомембраны<sup>6</sup> на полигоне повышает положительное воздействие извлечения тела полигона на показатель загрязнения водных объектов.

---

<sup>6</sup> Геомембрана – геосинтетик, изолирующий материал, применяющийся в строительстве для гидроизоляции, имеющий различный химический состав. Выделяют два основных вида геомембран из полиэтилена высокого давления и полиэтилена низкого давления.

## Обзор рассмотренных сценариев

Случай	Состав отходов	Есть ли изоляция в полигоне?	Число жителей в радиусе 1 км	Расстояние от полигона до переработки отходов (км)	Расстояние от объекта для переработки отходов до установок для получения энергии из отходов (газификатора)	Расстояние от полигона до установки для получения энергии из отходов (газификатора)	Критерий для выбора наилучшего сценария
1	100% MSW	Да	0	0	0	0	Наилучший чистый доход
2	100% MSW	Нет	1000	10	10	0	Наилучший чистый доход
3	75% MSW, 25% C&I	Да	0	0	0	0	Наилучший чистый доход
4	75% MSW, 25% C&I	Нет	1000	10	10	0	Наилучший чистый доход
5	50% MSW, 50% C&I	Да	0	0	0	0	Наилучший чистый доход
6	50% MSW, 50% C&I	Нет	1000	10	10	0	Наилучший чистый доход
7	25% MSW, 75% C&I	Да	0	0	0	0	Наилучший чистый доход
8	25% MSW, 75% C&I	Нет	1000	10	10	0	Наилучший чистый доход
9	100% C&I	Да	0	0	0	0	Наилучший чистый доход
10	100% C&I	Нет	1000	10	10	0	Наилучший чистый доход

## Обзор эксплуатационных и капитальных затрат для 10 сценариев

Сценарий	Затраты, евро		ОРЕХ извлечение грунта и сортировка (евро)		ОРЕХ WtE (евро)		ОРЕХ транспорт на WTF и WtE (евро)		CAPEX извлечение грунта и сортировка (евро)		CAPEX WtE (евро)	
	ХС	ЛС	ХС	ЛС	ХС	ЛС	ХС	ЛС	ХС	ЛС	ХС	ЛС
1	716819 611	515536 732	291233 938	291233 938	224312 794	224312 794	-	-	32680 988	-	168601 891	-
2	754191 849	51536 732	291233 938	291233 938	224312 794	224312 794	37044 569	-	32387 030	-	168563 393	-
3	679076 429	491499 857	285673 737	285673 737	205926 120	205926 120	-	-	32680 988	-	154895 584	-
4	715894 061	491499 857	285673 737	285673 737	205926 120	205926 120	36817 632	-	32680 988	-	32680 988	-
5	641333 247	443426 983	467462 983	279923 536	187539 446	187539 446	-	-	32680 988	-	141189 276	-
6	677596 273	443426 983	467462 983	279923 536	187539 446	187539 446	36263 026	-	32680 988	-	141189 276	-
7	603590 065	443426 108	274273 336	274273 336	169152 772	169152 772	-	-	32680 988	-	127482 969	-
8	639298 485	443426 108	274273 336	274273 336	169152 772	169152 772	35708 419	-	32680 988	-	127482 969	-
9	565846 883	419389 233	268263 135	268263 135	150766 098	150766 098	-	-	32680 988	-	113766 662	-
10	601000 696	419389 233	268263 135	268263 135	150766 098	150766 098	35153 814	-	32680 988	-	113766 662	-

Помимо этого, при наличии транспортирования повышаются негативные воздействия на выбросы парниковых газов, оксидов азота и серы. Для всех оцененных случаев потенциальный доход от РЗЭ высокий, превышая пороговое значение в 1,2 млрд. евро (данные не показаны). Элементами с наивысшей ценностью являются скандий, палладий, золото, алюминий и медь. Хотя количества скандия, палладия и алюминия по мере снижения их процентного содержания в MSW, количества золота, серебра, меди и др. элементов увеличиваются, благодаря чему доход остается высоким. Высокая изменчивость количеств РЗЭ, находящихся в теле различных полигонов могут быть связаны с тем фактом, что корреляция между РЗЭ и процентным содержанием в MSW была существенной только на двух полигонах.

Для обоснования модели и результатов DST инструмент поддержки принятия решений был проверен для полигона REMO<sup>7</sup> как конкретный случай. Исходные данные заимствованы из работы [17], и был использован сценарий с 50% MSW и 50% отходов C&I, который сопоставим с примерами, описанными в литературе. Экономические результаты DST отражены в табл. 15, вместе с результатами экономической оценки в работе [17].

Во время как для чистого дохода, дохода для WtE и затрат на извлечение грунта, сортировку и предварительную переработку, результаты характеризуются небольшим различием между данными DST и опубликованными данными, имеются большие различия для дохода от WtM и затрат на сжигание. Это не аннулирует результаты DST, но может связано с предположениями, сделанными в модели; например, в работе [18] рассматривается сценарий с построенной установкой АТТ с высокой производительностью, в то время как установка АТТ для расчетов DST характеризуется возможностью гибко менять производительность в зависимости от количества перерабатываемых отходов. Кроме того, некоторые различия, вероятно, могут быть результатом использованных экономических моделей; в работе [18] использовалась более сложная модель чистой текущей стоимости (NPV), в которой рассматривается изменение денежной ценности с течением времени, в то время как в DST это не учитывается.

Таблица 15

#### Результаты моделирования для полигона REMO

Результат	Значение DST (евро)	Значение в [18](евро)	Варьирование
Чистый доход	2123650	1933825	10%
Доход от WtM	2637355	736003	<b>258%</b>
Доход от WtE	8785195	6831834	29%
Затраты на извлечение грунта, сортировку и предварительную обработку	2875956	3373913	-15%
Затраты на сжигание	6304862	2260409	<b>179%</b>

<sup>7</sup> Полигон для депонирования бытовых и промышленных отходов, расположенный в 60 км от Брюсселя в провинции Лимбург, который находился в эксплуатации с начала 1970-х годов. Общее количество депонированных отходов составляет 16 млн. т, 33% которых можно подвергнуть рециклингу. В настоящее время бельгийская компания в секторе обращения с отходами Group Machiels, основанная в 1941 г., проводит на этом полигоне проект EFLM

## 5. Предупреждения

DST определяет рамки для оценки проектов для извлечения тела полигона. DST основан на значениях, заимствованных из литературы, которые необходимо обновлять с течением времени, так как становятся доступными новыми данными, для лучшего отражения процессов, приводящих к изменению состава отходов. Не был выполнен формальный анализ чувствительности для проверки взаимодействий между показателями, с целью проверки того, как сильно один показатель влияет на другой вследствие недостатка данных полевого масштаба, имеющихся для проверки, в то время как имеются влияния, которые упоминались ранее. Поэтому необходимо проявлять осторожность, имея в виду, что при различных установках моделей результаты могут оказаться не сопоставимыми, и рекомендации для сценариев извлечения и переработки тела полигона необязательно будут поддерживаться авторами. Используются некоторые предположения, такие как предел погрешности для состава отходов, эффективность технологического процесса, затраты на технологию, стоимость земли, подход взвешивания, и другие основаны на материалах двух небольших групп специалистов и двух профессионалов, которые должны быть рассмотрены пользователем при проверке результатов предложенного инструмента. Должны использоваться консервативные оценки, для того чтобы не переоценивать или не до оценивать критерии устойчивости.

## 6. Заключение

DST способен прогнозировать экономические, экологические и социальные результаты проекта ELFM, а также количество имеющихся РЗЭ и лучших технологий и технологий ELFM для использования. DST был разработан, чтобы пользователь мог пользоваться исходными параметрами или чтобы пользователь мог выбирать исходные параметры, предоставляемые с помощью обзора литературы. Пользователь может выбрать критерии для наилучшего сценария и сравнить различные сценарии процесса ELFM. В целом DST является первым инструментом такого вида и выступает в качестве инструмента первоначальной оценки для более сложных оценок и моделирования. DST облегчит внедрение или методы ELFM, предоставив технико-экономическую оценку, удобную для операторов полигона.

Обоснование модели показывает, что моделирование DST сопоставимо с литературными данными в отношении некоторых экономических результатах и отличается в отношении других. Исходя из этого, авторы рекомендуют, чтобы более сложные модели, учитывающие значение, менялись со временем, такие как NPV и полный анализ жизненного цикла (LCA). Кроме того, параметры, зависящие от времени, такие как рыночная стоимость, в будущем могут быть привязаны к постоянно обновляемым базам данных для повышения эффективности. В целом, DST является инновационным и прогрессивным инструментом, который успешно служит отправной точкой для операторов полигона для оценки возможности предлагаемого ELFM. DST помогает уменьшить неопределенность в отношении экономической осуществимости и социальных и экологических последствий ELFM и, следовательно, будет способствовать внедрению проектов ELFM.

## Библиография

- [1] CLAIRE (2010) A framework for assessing the sustainability of soil and groundwater remediation; available at <https://www.claire.co.uk/projects-and-initiatives/surf-uk> (accessed on 9 March 2018)
- [2] CLAIRE (2011) The SuRF-UK indicator set for sustainable remediation assessment; available at <https://www.claire.co.uk/projects-and-initiatives/surf-uk> (accessed on 9 March 2018)
- [3] *Danthurebandara, M., Van Passel, S., Vanderreydt, I. and Van Acker, K.* (2015) 'Environmental and economic performance of plasma gasification in Enhanced Landfill Mining', *Waste Management*, 45, pp. 458–467.
- [4] EURELCO (2017) EP votes YES to add LFM to Landfill Directive – EU Training Network for Resource Recovery Through Enhanced Landfill Mining.
- [5] Eurostat (2017) Euro annual inflation up to 0.6%. Available at: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/7755634/2-30112016-AP-EN.pdf/c606f3fc-f4e9-44c6-9b86-51f90988baf7> (accessed on 7 June 2017)
- [6] *Frändegård, P., Krook, J., Svensson, N. and Eklund, M.* (2013a) 'A novel approach for environmental evaluation of landfill mining', *Journal of Cleaner Production*. 55, pp. 24–34.
- [7] *Frändegård, P., Krook, J., Svensson, N. and Eklund, M.* (2013b) 'Resource and Climate Implications of landfill mining. *Journal of Industrial Ecology*', 17, pp. 744–745
- [8] *Gutiérrez-Gutiérrez, S. C., Coulon, F., Jiang, Y. and Wagland, S.* (2015) 'Rare earth elements and critical metal content of extracted landfilled material and potential recovery opportunities', *Waste Management*, 42, pp. 128–136.
- [9] *Jones, P. T., Geysen, D., Tielemans, Y., Van Passel, S., Pontikes, Y., Blanpain, B., Quaghebeur, M. and Hoekstra, N.* (2013) 'Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: A critical review', *Journal of Cleaner Production*. 55, pp. 45–55.
- [10] *Laner, D., Cencic, O., Svensson, N. and Krook, J.* (2016) 'Quantitative Analysis of Critical Factors for the Climate Impact of Landfill Mining', *Environmental Science & Technology*, 50, pp. 6882–6891.
- [11] *Lapko, Y., Trucco, P. and Naur, C.* (2016) 'The business perspective on materials criticality: Evidence from manufacturers', *Resources Policy*. 50, pp. 93–107.
- [12] Letsrecycle.com (2017) Prices: Metals. Available at: <http://www.letsrecycle.com/prices/metals/> (accessed on 7 June 2017)
- [13] London Metal Exchange (2017) LME Aluminium. Available at: <http://www.lme.com/metals/non-ferrous/aluminium/>. (accessed on 5 June 2017)
- [14] Metalary (2017) Lithium Price - Metalary. Available at: <https://www.metalary.com/lithium-price/>.
- [15] *Morf, L. S., Gloor, R., Haag, O., Haupt, M., Skutan, S., Lorenzo, F. Di and Böni, D.* (2013) 'Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste - Sources and fate in a Swiss incineration plant', *Waste Management*, 33, pp. 634–644.
- [16] OECD (2017) Prices - Inflation (CPI) - OECD Data. Available at: <https://data.oecd.org/price/inflation-cpi.htm#indicator-chart>. (accessed on 5 June 2017)
- [17] *Van Passel, S., Dubois, M., Eyckmans, J., De Gheldere, S., Ang, F., Tom Jones, P. and Van Acker, K.* (2013) 'The economics of enhanced landfill mining: Private and societal performance drivers', *Journal of Cleaner Production*, 55, pp. 92–102.
- [18] *Quaghebeur, M., Laenen, B., Geysen, D., Nielsen, P., Pontikes, Y., Van Gerven, T. and Spooren, J.* (2013) 'Characterization of landfilled materials: Screening of the enhanced landfill mining potential', *Journal of Cleaner Production*, 55, pp. 72–83.

- [19] *Ford, S., Warren, K., Lorton, C., Smithers, R., Read, A., M. H.* (2013) 'Feasibility and Viability of Landfill Mining and Reclamation in Scotland', (April), p. 99. available at: <http://www.wrap.org.uk>. (assessed on 15 May 2017)
- [20] *Sapsford, D., Cleall, P., Harbottle, M.* (2017) In situ Resource recovery from waste repositories: exploring the potential for mobilization and capture of metals from anthropogenic ores *J. Sustain. Metall.* 3:375–392
- [21] *Schade, W., Doll, C., Maibach, M., Peter, M., Crespo, F., Carvalho, D., Caiado, G., Conti, M., Lalic, A. and Afraz, N.* (2006) 'Analysis of the contribution of transport policies to the competitiveness of the EU economy and comparison with the United States', p. 195. Available at: [http://www.isi-projekt.de/wissprojekt-de/compete/download/COMPETE\\_Final\\_Report.pdf](http://www.isi-projekt.de/wissprojekt-de/compete/download/COMPETE_Final_Report.pdf) (accessed on 7 June 2017)
- [22] *Spooren, J., Nielsen, P., Quagbeur, M., Tielemans, Y.* (2012) 'Characterisation study of landfilled materials with a particular focus on the fines and their potential in enhanced landfill mining' GIN2012 conference proceedings, Linköping, Sweden.
- [23] *Wanka, S., Munnich, K. and Fricke, K.* (2016) 'Landfill Mining - Wet mechanical treatment of fine MSW with a wet jigger', *Waste Management*. Elsevier Ltd, 59, pp. 316–323.
- [24] *Wante, J. and Umans, L.* (2010) 'A European Legal Framework for Enhanced Waste Management', 1st international Symposium on Enhanced Landfill Mining, pp. 1–9. Available at: [http://elfm-symposium.eu/docs/Papers/ELFM\\_Symposium\\_2010\\_Paper02\\_Wante\\_Umans.pdf](http://elfm-symposium.eu/docs/Papers/ELFM_Symposium_2010_Paper02_Wante_Umans.pdf). (assessed on 15 May 2017)
- [25] *Wolfsberger, T., Nispel, J., Sarc, R., Aldrian, A., Hermann, R., Höllen, D., Pomberger, R., Budischowsky, A. and Ragossnig, A.* (2015) 'Landfill mining: Development of a theoretical method for a preliminary estimate of the raw material potential of landfill sites', *Waste Management & Research*, 33, pp. 671–680.
- [26] *Wolfsberger, T., Pinkel, M., Polansek, S., Sarc, R., Hermann, R. and Pomberger, R.* (2016) 'Landfill mining: Development of a cost simulation model', *Waste Management & Research*, 34, pp. 356–367.