

УДК 504.05, 504.03, 004.02

ВЫБОР УЧАСТКОВ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

© 2019 г. Т. И. Юганова^{1,*}

¹Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия
*E-mail: tigryu@gmail.com

Поступила в редакцию: 18.02.2019 г.

Проблема размещения объектов обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) чрезвычайно актуальна для России. Сложность такого рода задач обусловлена в первую очередь их междисциплинарностью, т.е. значительным количеством социальных, экономических и технических данных и сведений об окружающей среде, которые необходимо учитывать. Во многих странах в этих целях используются многокритериальные методы, доказавшие свою эффективность, позволяя выработать компромиссное и объективное решение. Рассмотрены методы Т.Л. Саати – анализ иерархий (АНР) и анализ сетей (АНР), приведены примеры их использования при выборе места размещения свалки ТКО и мусоросжигательного завода.

Ключевые слова: ТКО, обращение с отходами, выбор участка, многокритериальные методы, АНР, АНР.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019479-93>

ВВЕДЕНИЕ

Процесс управления твердыми коммунальными отходами (ТКО) имеет целью утилизировать большую часть производимых отходов; не утилизируемые фракции отходов депонируются на свалках или перерабатываются на специальных установках для сжигания отходов. Эти типы предприятий относятся к так называемым *нежелательным объектам* (undesirable facilities), размещение которых сталкивается с двумя основными проблемами: а) социальная оппозиция и б) большое количество социальных, экономических и технических данных и сведений об окружающей среде, которые необходимо учитывать [5].

В число заинтересованных сторон, влияющих на принятие решения о выборе места размещения объектов обращения с отходами, входят население, муниципальные и региональные администрации, государственные регулирующие органы, бизнес (компании по транспортировке ТКО, компании по эксплуатации полигонов ТКО), инвестиционные фонды, общественные организации для защиты окружающей среды, экспертное сообщество. Интересы организаций, эксплуатирующих объекты обращения с отхо-

дами, состоят в обеспечении рентабельности их деятельности. Государственные регулирующие органы должны быть нацелены на эффективное управление отраслью: формирование прозрачной рыночной среды, привлекательного инвестиционного климата, внедрение принципов устойчивого развития в практику обращения с отходами. Например, плата за размещение ТКО на полигоне должна быть достаточно высокой, чтобы более рациональные способы обращения с отходами (сортировка, переработка, получение энергии) имели экономические предпосылки к реализации.

Таким образом, проблема выбора мест для размещения объектов обращения с отходами затрагивает широкий круг участников, и для ее разрешения требуется учет множества разнообразных, а порой и противоположных мнений. Необходим многокритериальный механизм, который позволил бы выработать компромиссное и объективное решение, учитывающее интересы всех участников.

Следует особо отметить вопросы безопасности объектов обращения с отходами для окружающей среды, которые не только беспокоят население и общественные организации, но относятся

к сфере ответственности административных и природоохранных органов. Нормативными документами федерального и регионального уровней предписывается проведение экологической экспертизы проекта размещения объекта обращения с отходами с учетом последствий его функционирования для окружающей среды. Но действующие нормативы обычно имеют слишком общий характер и не могут учитывать все особенности и возможные взаимосвязи различных факторов окружающей среды; в нормативах отсутствует четкий состав анализируемых факторов, методики расчетов и принятия многокритериальных решений с учетом различных видов воздействий и их последствий [1]. Поэтому для безопасного размещения объекта обращения с отходами необходимо тщательное исследование природных условий территории, прогнозирование возможного развития и взаимодействия негативных процессов и включение полученных результатов в формулировки критериев для принятия решения.

В последнее время проблемы обращения с ТКО рассматривались с учетом подхода устойчивого развития. Система управления отходами должна быть экономически доступной, социально приемлемой и эффективной по отношению к окружающей среде: проект должен быть направлен на минимизацию использования невозобновляемых природных ресурсов и оптимизацию использования возобновляемых природных ресурсов, что приведет к уменьшению негативных последствий для будущих поколений [7].

В статье рассмотрены различные подходы к решению задачи размещения нежелательных объектов. Описаны многокритериальные методы принятия решений Т.Л. Саати: анализ иерархий и анализ сетей. Приведены примеры использования этих методов при выборе места размещения свалки ТКО и мусоросжигательного завода.

УПРАВЛЕНИЕ ТВЕРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ И МЕТОДЫ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА РЕШЕНИЙ

С 1960-х гг. было выполнено много работ по моделированию задач управления ТКО. Первые применения представляли собой модели землепользования и предназначались для оптимизации маршрутов сбора отходов и возможности для выбора участка. В конце 1980-х гг. были созданы более сложные модели; они фокусировались на экономических аспектах проблемы и были направлены на минимизацию общих затрат, связанных с управлением ТКО. На основе анализа “издержки – преимущества” (Cost Benefit Analysis) предлагались конкретные модели экономи-

ческого подхода, которые были реализованы для оценки различных стратегий управления отходами. В 1990-х гг. модели управления ТКО начали учитывать сложность, присущую проблемам принятия решений, и появились приложения многокритериального анализа (МКА). Эти модели рассматривают весь спектр потоков отходов, которыми необходимо управлять, и имеющиеся методы управления отходами в виде набора альтернатив, из которых можно выбрать предпочтительное решение на основе соображений по защите окружающей среды и экономических факторов для конкретных объектов [7]. Известно много моделей МКА, используемых для решения задач управления отходами [9], в том числе методы АНР в сочетании с ГИС [4, 10, 11, 13, 16, 18, 20], ANP [5, 7, 12], нечеткий МКА [6, 8, 15, 17, 23], PROMETHEE [14], ELECTRE [21], TOPSYS [17].

В настоящее время для решения задач управления ТКО чаще всего используется метод анализа иерархий (Analytic Hierarchy Process – АНР) [2], который уже более 30 лет широко применяется в самых различных областях деятельности человека. При выборе места размещения объекта обращения с отходами этот метод позволяет сопоставить важность различных критериев оценки участков для лица, принимающего решение (ЛПР), и ранжировать территорию или предварительно выбранные участки по пригодности для этой цели. Более сложный метод анализа сетей (Analytic Network Process – ANP) [3] применяется при наличии дополнительных связей между критериями и/или альтернативами. Свободно доступное программное обеспечение АНР и ANP (пакет программ SuperDecisions [25]) позволяет провести все необходимые расчеты и выполнить анализ чувствительности приоритетов отдельных участков к оценкам критериев.

В литературе упоминаются более сложные модификации методов АНР и ANP. Так, нечеткий АНР (Fuzzy АНР) позволяет лучше представить плохо определенную и содержащую помехи зашумленную информацию, размытые границы. Такие примеры задач выбора участка для свалки представлены в [15, 23]. Однако автор АНР Т.Л. Саати скептически относился к нечеткой методологии в АНР [24, 27], считая ее не обоснованной математически и не оправданной содержательно и полагая, что достаточно использовать промежуточные значения оценок критериев и рейтингов. Тем не менее в последние годы нечеткие оценки эффективно применяются для составления шкалы значений критериев выбора участков [6], их ранжирования [17], а также дополнительной оценки ранее отобранных альтернатив с привлечением других, менее формализованных критериев [8].

Таблица 1. Фундаментальная шкала (по [2, 3])*

Степень предпочтения	Определение	Комментарий
1	Равная предпочтительность	Две альтернативы одинаково предпочтительны с точки зрения цели
3	Средняя степень предпочтения	Опыт эксперта позволяет считать одну из альтернатив немного предпочтительнее другой
5	Умеренно сильное предпочтение	Опыт эксперта позволяет считать одну из альтернатив явно предпочтительнее другой
7	Очень сильное (явное) предпочтение	Опыт эксперта позволяет считать одну из альтернатив гораздо предпочтительнее другой: доминирование альтернативы подтверждено практикой
9	Абсолютное предпочтение	Очевидность подавляющей предпочтительности одной альтернативы над другой имеет неоспоримое подтверждение
2, 4, 6, 8**	Промежуточные значения	Если необходим компромисс
Обратные значения оценок предпочтения	Если предпочтительность критерия i имеет одно из приведенных выше значений, присвоенное ему по сравнению с критерием j , то предпочтительность j имеет обратное значение по сравнению с i	
Другие рациональные числа	Отношения, полученные на основе шкалы	Если необходимо повысить согласованность матрицы

* Фундаментальная шкала была получена на основе базовых уравнений модели нервного возбуждения, которые приводят к известному логарифмическому закону “стимул – реакция”. Эффективность этой шкалы была проверена во многих приложениях, а также путем сравнения с другими шкалами при решении практических задач, результаты которых были заранее известны [3].

** Когда сравниваемые элементы ближе друг к другу, чем указано шкалой, можно, например, использовать шкалу 1.1, 1.2, ..., 1.9 или т.п.

ОСНОВЫ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

Метод анализа иерархий представляет собой математическую процедуру, которая разлагает сложную задачу на более простые [2, 3]. В верхней части древовидной структуры, отображающей иерархию, находится *цель* (например, выбрать лучший участок для полигона ТКО), за которой следуют *критерии* ее достижения (экономические, социальные, геологические и др.), *подкритерии* (например, близость к источникам отходов, удаленность от исторических памятников, защищенность грунтовых вод) и на самом низком уровне – *альтернативы* (участки), из которых предстоит сделать выбор. Таким образом, АНР делит проблему принятия решения на понятные части, каждая из которых анализируется отдельно и логически интегрируется в общую схему. Рекомендуются в каждое разветвление структуры критериев включать не более 9 элементов¹.

Веса критериев (подкритериев) определяются с помощью *матриц попарных сравнений*. В такой матрице каждому критерию по сравнению с дру-

гим присваивается число, которое представляет собой условную оценку его относительной важности (предпочтительности), или “во сколько раз” этот элемент более важен, чем другой. Для обеспечения такого числового сравнения используется *фундаментальная шкала* Саати (табл. 1), где степень предпочтения эксперта или ЛПР выражается условными числовыми значениями, которые далее используются в математических операциях. Фундаментальная шкала нужна именно для выявления интуитивных предпочтений ЛПР, которые и должны лежать в основе принятия решения, хотя могут основываться на объективных данных.

По построенной таким образом матрице попарных сравнений вычисляется ее *главный собственный вектор*, который представляет собой вектор *приоритетов* (веса) *критериев*, обобщающий выполненные попарные сравнения².

¹ Это соответствует известному положению психологии, согласно которому человек обычно не в состоянии одновременно оперировать более чем с 7–9 объектами; кроме того, при несоблюдении указанной рекомендации возможна математическая несостоятельность процедуры.

² При заполнении матрицы используются интуитивные суждения ЛПР, поэтому вполне возможна ситуация, когда i предпочтительнее j в m раз, j лучше k в n раз, но i лучше k не в mn раз, тем более что предпочтительность ограничена числом 9. Поэтому вместе с собственным вектором рассчитывается так называемое *отношение согласованности* (consistency ratio – CR), которое не должно превышать 0.1. В противном случае матрица считается несогласованной и должна быть пересмотрена. Например, следует устранить прямые противоречия, когда в указанной выше ситуации i не лучше k .

При наличии подкритериев аналогичным образом определяются их локальные веса в рамках вышестоящего критерия и умножаются на его вес. Так получаются глобальные веса всех подкритериев.

Если альтернатив немного (например, несколько заранее выбранных участков), то для каждого подкритерия они сопоставляются между собой путем построения соответствующей матрицы попарных сравнений и определения приоритетов альтернатив (насколько данная альтернатива лучше другой по этому подкритерию). Далее эти векторы приоритетов умножаются на веса соответствующих подкритериев и суммируются, формируя *окончательные приоритеты (ранжирование) альтернатив*. Отметим, что на этом этапе количество требуемых матриц сравнений равно произведению числа альтернатив на число подкритериев.

Если альтернатив много (например, элементы сетки ГИС), т.е. провести нужное количество сравнений затруднительно, то следующий шаг – составление ранговой шкалы значений для каждого критерия (подкритерия). Это могут быть числовые или лингвистические оценки (например, ценность ландшафта низкая, ниже средней, средняя, выше средней, высокая), которые также желательно перевести в числовые значения (рейтинги) относительной шкалы предпочтений, например, аналогично табл. 1. Затем каждой альтернативе (элементу сетки) присваиваются рейтинги по каждому подкритерию, умножаются на веса этих подкритериев и складываются. Так получаются приоритеты альтернатив, интегрирующие их рейтинги по всем подкритериям. Спектр приоритетов на карте можно, например, переклассифицировать в несколько цветов, присвоив им лингвистические значения пригодности. Пример совместного применения методологии АНР и ГИС приводится в следующем разделе.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ТКО

Зарубежная литература по выбору участка для полигона ТКО с использованием АНР представлена различными странами: Греция [18], Индия [22], Ирак [4], Иран [11], Марокко [15], Нигерия [13], Северный Кипр [16], Сербия [10], Турция [20]. Чаще всего эта задача решается с использованием возможностей геоинформационных систем (ГИС).

Рассмотрим применение АНР и ГИС на примере работы [10], где детально описана методология выбора участка для депонирования отходов в муниципалитете Панчево (Municipality of Pančevo, Сербия). Цель – районирование территории по

пригодности для размещения полигона. Сравниваются и оцениваются две группы, семь критериев и восемнадцать подкритериев (табл. 2).

В табл. 3 приводится одна из матриц попарных сравнений. По всем подкритериям построены слои карт в ГИС на основе рейтингов, назначенных ЛПП (табл. 4).

Окончательная карта была получена путем наложения слоев подкритериев (с учетом их глобальных приоритетов) и переклассифицирована в четыре категории: территория непригодна, мало пригодна, умеренно пригодна и наиболее пригодна. Полученные результаты дали соответственно 62.31, 13.49, 12.08 и 12.12%. При этом важнейшими были инженерно-геологические критерии (глобальный вес 0.49), за которыми следовали гидрогеологические и гидрологические (0.22). Геоморфологический критерий (уклон) был наименее важным среди геологических критериев (см. табл. 2).

ОСНОВЫ МЕТОДА АНАЛИЗА СЕТЕЙ

Метод анализа сетей [3, 5, 7] является развитием АНР, расширяющим возможности представления сложных взаимосвязей между компонентами системы. Так, многие проблемы принятия решений нельзя представить иерархическими структурами, потому что в них существуют зависимости и взаимодействия между элементами разных уровней. Например, существуют задачи, в которых не только важность критериев влияет на приоритеты альтернатив (как в иерархиях), но также приоритеты критериев зависят от альтернативы (так, для разных участков территории важность критерия присутствия зон трещиноватости может различаться). Для разработки модели АНР необходимо выполнить пять фундаментальных шагов [7].

1. *Разработать структуру процесса принятия решений.* Сюда входят определение основной цели и построение *кластеров* критериев, состоящих из различных элементов (*узлов*), которые влияют на решение, а также кластера альтернатив (вариантов выбора). Необходимо определить все связи (влияния) между кластерами и внутри них, т.е. построить сеть. В методологии АНР часто рекомендуется отдельно построить подсети для Преимуществ, Возможностей, Издержек и Рисков (Benefits–Opportunities–Costs–Risks – BOCR). Преимущества и Издержки обычно рассматриваются в краткосрочной перспективе и относятся к внутренним аспектам, которые, например, при выборе участка размещения объекта описывают территориальную систему. Возможности и Риски рассматриваются в средне- и долгосрочной перспективе и касаются внешних факторов, которые могут быть обусловлены строительством в этой территориальной

Таблица 2. Дерево критериев (по [10])

Критерии	Подкритерий	Вес (глобальный)
<i>Геологические критерии (A1)</i>		0.750*
Геоморфологические (B1)		0.055
	Уклон ландшафта (C1)	1.0
Гидрогеологические и гидрологические (B2)		0.290 (0.218)
	Глубина грунтовых вод (C2)	0.731 (0.159)
	Проницаемость почвы (C3)	0.188
	Затопляемость (C4)	0.081
Инженерно-геологические (B3)		0.655 (0.491)
	Литология (C5)	0.551 (0.271)
	Устойчивость грунтов (C6)	0.274
	Несущая способность (C7)	0.131
	Конструкционные материалы (C8)	0.044
<i>Другие критерии (A2)</i>		0.250
Окружающая среда (B4)		0.565 (0.141)
	Удаленность от источников водоснабжения (C9)	0.714 (0.101)
	Удаленность от термоминеральных источников (C10)	0.143
	Удаленность от рек и каналов (C11)	Ограничение**
	Удаленность от охранных зон (C12)	0.143
	Удаленность от газо- и нефтепроводов (C13)	Ограничение
Экономические (B5)		0.055
	Удаленность от авто- и железных дорог (C14)	1.0
Социальные (B6)		0.262
	Удаленность от населенных пунктов (C15)	0.833
	Удаленность от аэропортов (C16)	Ограничение
	Удаленность от культурных объектов (C17)	0.167
Климатические (B7)		0.118
	Направления ветров (C18)	1.0

*Жирным шрифтом выделены группы критериев, критерии и подкритерии с наибольшими глобальными весами.

**Критерии, обозначенные как "Ограничения" (*исключающие*), не учитываются при расчетах весов.

системе. Пример сети, включающей компоненты VOCR, описан в следующем разделе.

2. Для всех связей *выполнить попарные сравнения*, определяя относительную важность различных элементов по отношению к определенному компоненту сети.

3. Последовательно сформировать так называемые *суперматрицы*. Каждая суперматрица строится по отношению к одному из *управляющих критериев* (например, защита окружающей среды, социально-экономические аспекты или т.п.). Начальная (*невзвешенная*) суперматрица состоит из клеток, каждая из которых в свою очередь является матрицей собственных векторов, которые производятся из матриц попарных сравнений

компонентов подсети управляющего критерия (см. п. 2). Пример невзвешенной суперматрицы приводится в следующем разделе. Для кластеров, непосредственно подчиненных управляющему, строится отдельный вектор приоритетов и применяется к начальной суперматрице как веса соответствующих клеток, а результатом является *взвешенная* суперматрица. Ее элементы позволяют представить и предварительно оценить взаимозависимости, существующие между компонентами подсети. Затем взвешенная суперматрица последовательно умножается сама на себя, чтобы охватить все взаимосвязи в рамках подсети; этот процесс математически сходится³ с получением

³ Если все матрицы сравнений содержат не более 9 элементов и согласованы.

Таблица 3. Матрица попарных сравнений для геологических критериев [10]

A1	B1	B2	B3	Приоритет
Геоморфологические (B1)	1	1/7	1/9	0.055
Гидрогеологические и гидрологические (B2)	7	1	1/3	0.290
Инженерно-геологические (B3)	9	3	1	0.655

Примечание: CR = 0.067. Обозначения A1, B1, B2, B3 см. в табл. 2.

Таблица 4. Ранговые шкалы и рейтинги (по [10])

Подкритерий *	Ранговая шкала **	Рейтинг
Уклон ландшафта, % (C1)	0–2	0
	2–10	1
	>10	0.5
Глубина грунтовых вод, м (C2)	<3	0
	3–7	0.25
	7–10	0.5
	>10	1.0
Литология (C5)	Pa; (P,PG)a; PRPa; PGb	0
	l, lp, PGd	0.5
	PRGld	1
Устойчивость (C6)	l, lP	0
	PGd	0.5
	Pa; (P,PG)a; PGb; PRPa; PRGld	1
Несущая способность (C7)	PGb	0
	l, lp, PRGld, PGd	0.5
	Pa, (P,PG)a, PRPa	1
Конструкционный материал (C8)	PRPa; Pa; (P,PG)a	0
	l, lp	0.5
	PRGld, PGb, PGd	1
Направления ветров (C18)	Равнинные области	0
	SE, NW	0.25
	N, W, E, S, SW	0.5
	NE	1

* Критерии C3, C4, C9–C17 (см. табл. 2) – исключают, т.е. имеют только два значения: 0 или 1. При создании карты районирования можно отдельно построить общий слой для всех исключенных критериев и на этой основе выделить сразу все запретные зоны.

** Pa – песчаные, аллювиальные; (P,PG)a – песчаные и песчаные глины, аллювиальные; PRPa – илистые пески, затопляемые фации; PGb – песчаные глины, болота; PGd – песчаные глины, делювиальные, l – лессы; lp – песчаные лессы; PRGld – лессовые глины.

предельной матрицы – устойчивого набора весов, т.е. конечного вектора приоритетов для управляющего критерия.

4. Для каждого из четырех компонентов ВОСР (см. п. 1) получить *общие приоритеты альтернатив*, умножая веса управляющих критериев на их векторы приоритетов (см. п. 3) и складывая полученные векторы. Следует отметить, что набор управляющих критериев может быть

одинаковым во всех четырех подсетях ВОСР, но их веса и более глубокая структура обычно различаются, и даже одинаковые критерии оцениваются по-разному. В итоге необходимо интегрировать полученные вектора приоритетов компонентов ВОСР, применяя одну из формул агрегирования, например,

$$B + O - C - R,$$

$$(B \cdot O)/(C \cdot R) \text{ или}$$

$$w_B B + w_O O - w_C C - w_R R,$$

где B , O , C и R – компоненты BOCR, а w_i – их веса [7].

5. Провести *анализ чувствительности* окончательного результата модели к оценкам предпочтений для проверки ее надежности.

Все описанные расчеты можно выполнить посредством программного обеспечения SuperDecisions [25].

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА СЕТЕЙ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ МУСОРОСЖИГАТЕЛЬНОГО ЗАВОДА

Структура сети

Использование методологии ANP для выбора места расположения объекта обращения с отходами значительно менее распространено, чем ANP. Можно указать работы [5] (Испания), [19] (Иран), [7, 12] (Италия), [26] (Турция).

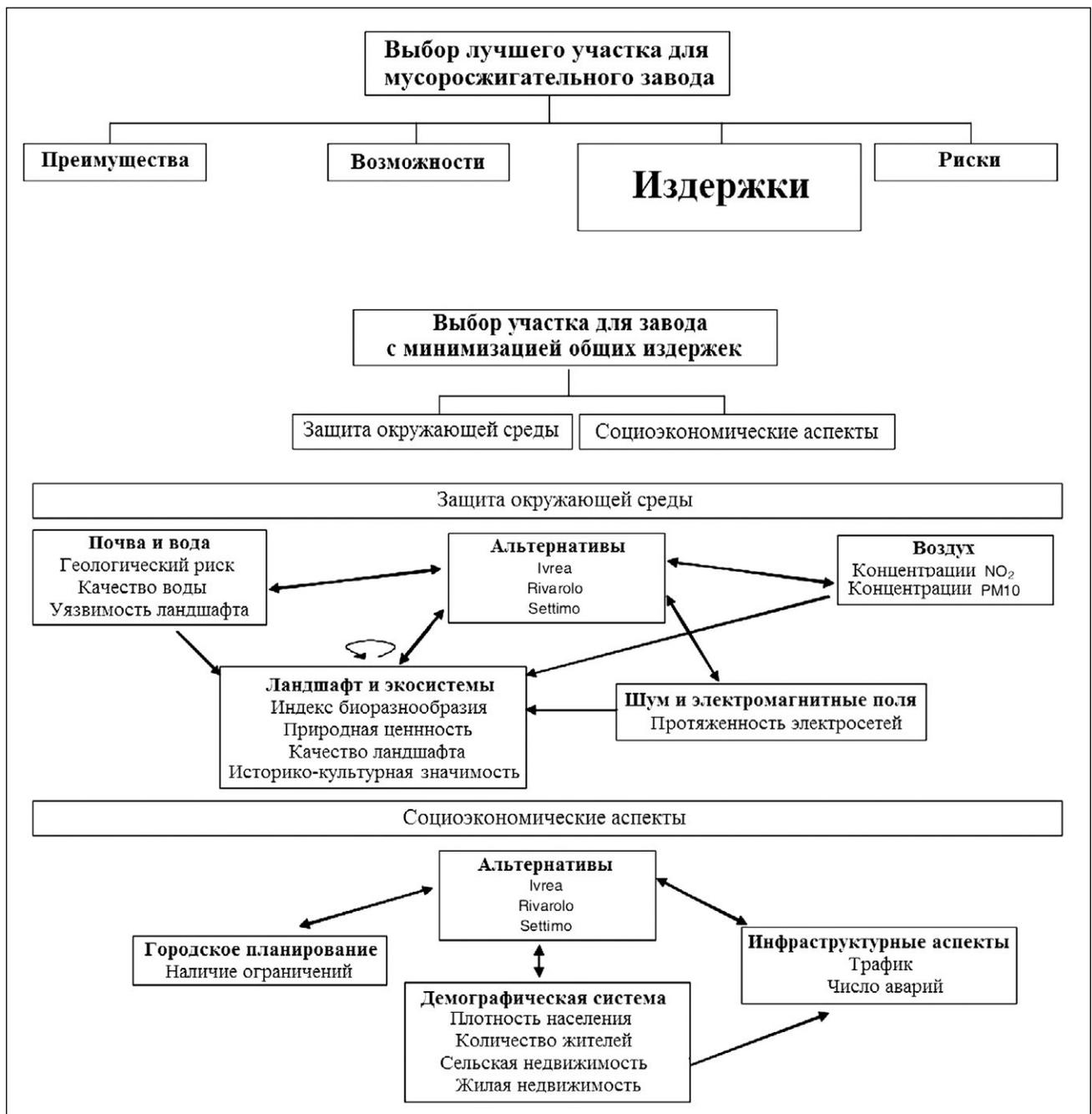


Рис. 1. Модель ANP–BOCR для подсети Издержек (по [7]).

В статье [7] детально рассмотрены все этапы применения ANP. Здесь не используется ГИС, но на основе ANP сравниваются три потенциальных участка (Ivrea, Rivarolo и Settimo) для муниципального мусоросжигательного завода в провинции Турин (Torino, Италия). Был выявлен 31 индикатор окружающей среды и социально-экономических условий. Эти индикаторы были сгруппированы в кластеры и организованы в четыре подсети в соответствии с моделью ВОСР. В табл. 5 представлен полный набор оцениваемых критериев, отражающих все аспекты, связанные с задачей принятия решения. Отметим, что анализ управляющего критерия Защита окружающей среды в рамках ВОСР показывает, что для каждого компонента ВОСР требуется своя оценка природных условий, включая состав кластеров и индикаторов. Наиболее детально этот критерий представлен в Издержках (4 кластера и 10 индикаторов) и Рисках (3 кластера и 4 индикатора). На рис. 1 показана структура подсети Издержек. Стрелки указывают на взаимосвязи между компонентами сети: например, показаны зависимости качества воды от биоразнообразия, трафика от плотности населения.

Матрицы попарных сравнений, необходимые в анализе, заполнялись на основе фундаментальной таблицы Саати, но с учетом количественных данных по конкретным индикаторам. Этот выбор позволяет преодолеть трудности, связанные

с опросом экспертов и ЛПР, чтобы выявить их предпочтения: учет технических элементов, которые поддаются измерению и, следовательно, объективно сопоставимы, имеет большое значение для достижения консенсуса при принятии решения, уменьшения конфликтов и, следовательно, прокладывания пути к решению о размещении нежелательных объектов. Приведем пример, где сопоставлены прямые значения индикаторов и оценки ЛПР в фундаментальной шкале (табл. 6). Значения приоритетов не совпадают, но их порядок сохраняется. Процедура, применяемая для стандартизации значений индикаторов в шкалу 1–9, позволяет оценивать обратные связи альтернатив с индикаторами, а также взаимосвязи между индикаторами.

Суперматрицы

После того, как матрицы попарных сравнений для всех связей в сети заполнены, совокупность соответствующих векторов приоритетов формирует *невзвешенную суперматрицу*. Следует отметить, что каждая подсеть ВОСР дополнительно подразделяется на две отдельные модели, относящиеся к двум управляющим критериям, которые были определены для анализа. Это приводит к двум различным суперматрицам в каждой из четырех подсетей. Рис. 2 представляет пример такой суперматрицы. Здесь показана зависимость вертикального показателя от горизонтального, или

Кластер	Альтернатива или индикатор	Альтернативы (важность индикаторов для альтернатив)			Инфраструктурные аспекты		Городское планирование	Демографическая система			
		I	R	S	AF	NA		PC	DP	NR	RR
Альтернативы (приоритеты альтернатив по индикаторам)	Ivrea (I)	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	0.82	0.74	0.18	0.14	0.58
	Rivarolo (R)	0.00	0.00	0.00	0.20	0.56	0.09	0.06	0.08	0.57	0.11
	Settimo (S)	0.00	0.00	0.00	0.68	0.32	0.09	0.19	0.74	0.29	0.31
Инфраструктурные аспекты	Трафик (AF)	0.33	0.20	0.67	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
	Число аварий (NA)	0.67	0.80	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Городское планирование	Ограничения (PC)	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Демографическая система	Плотность населения (DP)	0.41	0.05	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Количество жителей (NR)	0.07	0.10	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Сельская недвижимость (RR)	0.12	0.67	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Жилая недвижимость (RE)	0.41	0.18	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Рис. 2. Невзвешенная суперматрица для управляющего критерия Социально-экономические аспекты в подсети Издержки (по [7]).

Таблица 5. Индикаторы для модели ANP-BOCR и связанные с ними характеристики альтернативных участков (по [7])

Компонент BOCR	Управляющий критерий	Кластер	Индикатор	Аббревиатура	Единица измерения	Направление оценки	Значения для альтернатив			
							Ivgea	Rivarolo	Settimo	
Преимущества	Защита окружающей среды	Шум и электромагнитные поля	Акустический класс	АС	класс	↑	III	III	VI	
			Социально-экономические аспекты	Инфраструктура	ID	км ⁻¹	↑	6.1	3.6	6.2
Возможности	Защита окружающей среды	Воздух	Снижения эмиссии из-за энергетической утилизации отходов	ER	класс	↑	слабое	слабое	среднее	
			Перепрофилирование промышленной зоны	IA	экспертное суждение	↑	нет	среднее	высокое	
	Социально-экономические аспекты	Городское планирование	Коэффициент фильтрации	AT	м ² /с	↑	2.78×10 ⁻³	6×10 ⁻⁴	4.5×10 ⁻²	
			Согласованность с действующими инструментами планирования	CP	класс	↑	низкая	средняя	высокая	
Идержки	Защита окружающей среды	Почвы, горные породы и воды	Геологический риск	GR	экспертное суждение	↓	есть	нет	нет	
			Индекс качества поверхностных вод	SW	класс	↓	средний	от среднего до низкого	низкий	
			Уязвимость (% областей с высокой уязвимостью в 5-км буферной зоне)	VA	%	↓	91	31	32	
			NO ₂ : количество ячеек ^a с концентрацией выше годового предельного значения (40 мкг/м ³)	NO	количество	↓	0	13	29	
		Воздух	PM10: количество ячеек ^a с массовой концентрацией частиц <10 мкм выше годового предельного значения (40 мкг/м ³)	PM	количество	↓	0	4	12	
				Протяженность электросетей	LE	км	↓	4.6	9.8	26.1
		Ландшафт и экосистемы	Ландшафт и экосистемы	Индекс биоразнообразия (% территории в 2-км зоне с высоким индексом биоразнообразия)	BI	%	↓	39.6	35.7	3.8
					Природная ценность	NV	класс	↓	высокая	высокая
				Значимость культурного и исторического наследия	ЛQ	класс	↓	высокое	среднее	низкое
					SC	класс	↓	высокая	низкая	средняя

Таблица 5. Продолжение

Ком- понент ВОСР	Управляющий критерий	Кластер	Индикатор	Абре- виатура	Единица измерения	Направ- ление оценки	Значения для альтернатив			
							Ivrea	Rivarolo	Settimo	
Издержки	Социально- экономические аспекты	Городское плани- рование	Наличие ограничений	PC	есть/нет	↓	есть	нет	нет	
			Инфраструктур- ные аспекты	Фактический трафик в пределах 2 км от участка	AF	количество автомашин	↓	12 200	16 600	27 315
				Число аварий на 100 км	NA	количество	↓	25.3	43.9	39.2
	Демографическая система		Плотность населения	DP	чел./км ²	↓	931	28	449	
			Количество постоянных жителей	NR	количество	↓	40 596	20 410	82 517	
			Сельская недвижимость	RR	млн €	↓	4.031	6.814	5.097	
			Жилая недвижимость	RE	млн €	↓	108.547	49.745	87.336	
	Воздух		Дисперсия NO _x : среднегодовая кон- центрация на 50 ячеек ^a с наивыс- шей средней концентрацией	DC	мкг/м ³	↓	2.84	1.83	1.58	
			Эмиссия CO ₂	CO	т/год	↓	220.6	154.3	125.1	
			Уязвимость ландшафта	LS	класс	↓	высокая	средняя	низкая	
Риски	Защита окружающей среды	Шум и электро- магнитные поля	Присутствие чувствительных рецеп- торов в пределах 500-метровой зоны	PS	количество	↓	6	6	2	
			Расстояние от ближайшей желез- нодорожной станции	DN	км	↓	5.8	3.1	6.7	
	Социально- экономические аспекты		Суммарный пробег мусоровозов за год	KM	тыс. км	↓	1102.782	771.393	625.354	
			Изменение доли тяжелых грузови- ков в радиусе 2 км от площадки	VH	%	↓	0.8	0.6	0.4	
Демографическая система		Количество зданий на каждый охваченный километр	NB	количество/ км	↓	4.3	7.7	6.8		

^a Ячейки сетки на прогнозной карте загрязнения воздуха.

Таблица 6. Оценки индикатора Жилая недвижимость для трех альтернативных участков на основе фактической стоимости и приоритеты на основе попарных сравнений (по [7])

Альтернатива	Значение индикатора	Пересчет в шкалу 1–9	Относительная оценка	Приоритет
Ivrea	108 546 700 €	9	0.44	0.58
Rivarolo	49744 860 €	4.14	0.20	0.11
Settimo	87 335 748 €	7.20	0.35	0.31

Таблица 7. Конечные приоритеты для элементов модели по компонентам BOCR (по [7])

BOCR	Управляющий критерий (вес)	Кластер	Элемент	Конечный приоритет по управляющему критерию		
Преимущества	Защита окружающей среды (0.25)	Альтернативы	I	0.07		
			R	0.07		
			S	0.36		
		Шум и электромагнитные поля	AC	0.50		
	Социально-экономические аспекты (0.75)	Альтернативы	I	0.16		
			R	0.06		
			S	0.28		
		Инфраструктурные аспекты	ID	0.50		
Возможности	Защита окружающей среды (0.83)	Альтернативы	I	0.07		
			R	0.07		
			S	0.36		
		Воздух	ER	0.42		
		Почва и вода	IA	0.04		
			AT	0.04		
	Социально-экономические аспекты (0.17)	Альтернативы	I	0.03		
			R	0.12		
			S	0.35		
		Городское планирование	CP	0.50		
		Издержки	Защита окружающей среды (0.75)	Альтернативы	I	0.16
					R	0.12
S	0.18					
Почва и вода	GR			0.01		
	SW			0.01		
	VA			0.01		
Воздух	NO			0.17		
	PM			0.09		
	Шум и электромагнитные поля			LE	0.05	
Ландшафт и экосистемы	BI			0.09		
	NV			0.04		
	LQ			0.03		
	SC		0.04			
	Социально-экономические аспекты (0.25)		Альтернативы	I	0.16	
				R	0.15	
S				0.19		
Городское планирование			PC	0.07		
Инфраструктурные аспекты			AF	0.10		
		NA	0.12			
Демографическая система		DP	0.04			
		NR	0.05			
		RR	0.07			
	RE	0.06				

Таблица 7. Продолжение

ВОСР	Управляющий критерий (вес)	Кластер	Элемент	Конечный приоритет по управляющему критерию
Риски	Защита окружающей среды (0.33)	Альтернативы	I	0.30
			R	0.15
			S	0.05
		Воздух	DC	0.12
			CO	0.15
			LS	0.08
	Социально-экономические аспекты (0.67)	Ландшафт и экосистемы	PS	0.15
			Шум и электромагнитные поля	
		Альтернативы	I	0.13
			R	0.19
			S	0.16
		Инфраструктурные аспекты	DN	0.09
			KM	0.09
VH	0.06			
Демографическая система	NB	0.28		

Примечание: Аббревиатуры см. в табл. 5. Суммарные приоритеты по каждому управляющему критерию равны 1.

влияние второго на первое. Выделены приоритеты элементов, которые попарно сравнивались выше (см. табл. 6).

Приоритеты кластеров в рамках управляющего критерия были получены из экспертных заключений администрации провинции. С учетом этих приоритетов были рассчитаны *взвешенные суперматрицы*, где альтернативы получили соответствующие взвешенные приоритеты, отдельно в каждой подсети для каждого управляющего критерия. Далее для всех подсетей были рассчитаны *предельные суперматрицы*. Результаты моделирования сети показаны в табл. 7.

По табл. 7 можно видеть, что для управляющего критерия Защита окружающей среды высокие значения в модели получил кластер Воздух, особенно для подсетей Возможности и Издержки: наивысшие приоритеты относятся к индикаторам Снижение эмиссии для Возможностей (0.417) и NO₂ для Издержек (0.165) соответственно (см. табл. 5).

Агрегирование

Наконец, чтобы получить ранжирование участков для каждой из четырех подсетей ВОСР, необходимо синтезировать предварительные приоритеты альтернатив, полученные из предельных суперматриц

(см. табл. 7), путем нормализации их по кластеру альтернатив и умножения полученных значений на веса управляющих критериев. Эти веса были определены по мнениям экспертов. Синтезированные приоритеты участков приведены в табл. 8 (столбцы 2–5). Далее необходимо агрегировать результаты расчета приоритетов альтернатив по компонентам ВОСР. В табл. 8 показан окончательный рейтинг участков в соответствии с различными формулами агрегирования. Все приведенные формулы сходятся на том, что Settimo – наиболее пригодный участок, за ним следует Ivrea и последний – Rivarolo.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время проблема размещения объектов обращения с ТКО в России является весьма важной. В высокоразвитых странах эта проблема, по-видимому, уже решена, но для остальной части мира она в XXI в. стала весьма актуальной, о чем свидетельствует большое количество публикаций. Сложность задачи обусловлена в первую очередь ее междисциплинарностью, т.е. значительным количеством социальных, экономических и технических данных и сведений об окружающей среде, которые необходимо учитывать. Поэтому в большинстве источников используются методы многокритериального анализа (МКА), которые позволяют

Таблица 8. Приоритеты альтернатив в рамках ВОСР и окончательное ранжирование по различным формулам (по [7])

Участок	<i>B</i>	<i>O</i>	<i>C</i>	<i>R</i>	$B+O-C-R$	$B+O+1/C+1/R$	$B+(1-C)+O+(1-R)$	$(B \cdot O)/(C \cdot R)$
Ivrea	0.28	0.12	0.34	0.35	-0.407	0.271	0.227	0.062
Rivarolo	0.13	0.16	0.27	0.38	-0.433	0.267	0.213	0.044
Settimo	0.59	0.72	0.39	0.27	0.160	0.462	0.560	0.894

выработать компромиссное и объективное решение с учетом множества часто противоречивых факторов и интересов различных участников. В настоящее время для выбора участков размещения объектов обращения с отходами чаще всего используются подходы Т.Л. Саати: метод анализа иерархий (АНР) и метод анализа сетей (АНР). Они позволяют структурировать задачу на достаточно автономные блоки (критерии, подкритерии, факторы) и оценить их по отдельности (возможно, разными специалистами), сопоставлять по важности для ЛПР или критерия более высокого уровня, затем добавить в модель возможные взаимосвязи блоков и, наконец, рассчитать приоритеты альтернатив решения с помощью доступного программного обеспечения. Программное обеспечение методов Саати дает возможность провести анализ чувствительности результата к субъективным оценкам важности критериев. Приведенные примеры использования методов АНР и АНР показывают их эффективность при выборе места размещения объекта.

Источник финансирования. *Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №15 в рамках проекта “Научные основы технологии выбора участков экологически безопасного размещения территориально-производственных комплексов (ТПК) по переработке твердых бытовых отходов и захоронения не утилизируемой части отходов”.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ориханов Т.А.* Градостроительные аспекты, направленные на обеспечение экологической безопасности территорий размещений полигонов ТБО // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. №3. С. 150-153.
2. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. *Р.Г. Вачнадзе*. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
3. *Саати Т.Л.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. Пер. с англ. / Науч. ред. *А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова*. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 360 с.
4. *Alanbari M.A., Al-Ansari N., Jasim H.K.* GIS and multicriteria decision analysis for landfill site selection in Al-Hashimiyah Qadaa // *Natural Science*. 2014. V. 6. P. 282-304.
5. *Aragonés-Beltrán P., Pastor-Ferrando J.P., García-García F., Pascual-Agulló A.* An Analytic Network Process approach for siting a municipal solid waste plant in the Metropolitan Area of Valencia (Spain) // *J. of Environmental Management*. 2010. N 91. P. 1071-1086.
6. *Aydi A., Zairi M., Dhia H.B.* Minimization of environmental risk of landfill site using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and weighted linear combination methodology in a geographic information system environment // *Environmental Earth Sciences*. 2013. V. 68. N 5. P. 1375-1389.
7. *Bottero M., Ferretti V.* An Analytic Network Process-based approach for location problems: The case of a new waste incinerator plant in the Province of Torino (Italy) // *J. of Multi-Criteria Decision Analysis*. 2011. V. 17. N 3-4. P. 63-84.
8. *Chang N.-B., Parvathinathan G., Breen J.B.* Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region // *J. of Environmental Management*. 2008. V. 87. N 1. P. 139-153.
9. *Coelho L.M.G., Lange L.C., Coelho H.M.G.* Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods // *Waste Management & Research*. 2017. V. 35. N 1. P. 3-28.
10. *Djokanović S., Abolmasov B., Jevremović D.* GIS application for landfill site selection: a case study in Pančevo, Serbia // *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*. 2016. V. 75. N 3. P. 1273-1299.
11. *Eskandari M., Homae M., Mahmoodi S., Pazira E., Van Genuchten M.Th.* Optimizing landfill site selection by using land classification maps // *Environmental Science & Pollution Research*. 2015. V. 22. N 10. P. 7754-7765.
12. *Ferretti V., Pomarico S.* Integrated sustainability assessments: a spatial multicriteria evaluation for siting a waste incinerator plant in the Province of Torino (Italy) // *Environment Development & Sustainability*. 2012. V. 14. N 5. P. 843-867.
13. *Haruna R.L., Alaga T.A., Gajere E.N., Chioma U., Amos S.I.* Landfill site selection for solid waste management in Karu Lga, Nasarawa state, Nigeria // *International Journal of Trend in Research & Development*. 2016. V. 3. N 6. P. 436-467.
14. *Josimović B., Marić I.* Methodology for the regional landfill site selection // *Sustainable Development – Authoritative and Leading Edge Content for Environmental Management* / *S. Curkovic* (ed.). IntechOpen, 2012. P. 513-538. http://cdn.intechopen.com/pdfs/38102/Intech-Methodology_for_the_regional_landfill_site_selection.pdf (дата обращения 09.01.2019).
15. *Kaoutar B., Lahcen B.* A decision support approach for optimized siting of municipal solid waste landfill case study Tangier Morocco // *International Journal of Engineering Research & Applications (IJERA)*. 2012. V. 2. N 6. P. 1676-1684.
16. *Kara C., Doratli N.* Application of GIS/AHP in siting sanitary landfill: a case study in Northern Cyprus // *Waste Management & Research*. 2012. V. 30. N 9. P. 966-980.
17. *Kharat M.G., Kamble S.J., Raut R.D., Kamble S.S., Dhume S.M.* Modeling landfill site selection using an

- integrated fuzzy MCDM approach // *Modeling Earth Systems & Environment*. 2016. V. 2. N 2. Article 53. 16 p.
18. *Kontos T.D., Komilis D.P., Halvadakis C.P.* Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology // *Waste Management*. 2005. V. 25. N 8. P. 818-832.
 19. *Motlagh Z.K., Sayadi M.H.* Siting MSW landfills using MCE methodology in GIS environment (Case study: Birjand plain, Iran) // *Waste Management*. V. 46. P. 322-337.
 20. *Nas B., Cay T., Iscan F., Berktaay A.* Selection of MSW landfill site for Konya, Turkey using GIS and multi-criteria evaluation // *Environmental Monitoring & Assessment*. 2010. V. 160. N 1. P. 491-500.
 21. *Norese M.F.* ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localisation of waste-treatment plans // *Land Use Policy*. 2006. V. 23. N 1. P. 76-85.
 22. *Poorna A.C., Vinod P.G.* Solid waste disposal site selection by data analysis using GIS and Remote sensing tools: A case study in Thiruvananthapuram corporation area // *International Journal of Geomatics & Geosciences*. 2016. V. 6. N 4. P. 1734-1747.
 23. *Russo R. de F.S.M., Camanho R.* Criteria in AHP: a systematic review of literature // *Procedia Computer Science*. 2015. V. 55. P. 1123-1132.
 24. *Saaty T.L., Tran L.T.* Fuzzy judgments and fuzzy sets // *International Journal of Strategic Decision Sciences*. 2010. V. 1. N 1. P. 23-40.
 25. SuperDecisions / Expert Choice // <https://superdecisions.com/> (дата обращения 09.01.2019).
 26. *Tuzkaya G., Önüt S, Tuzkaya U.R., Gülsun B.* An analytic network process approach for locating undesirable facilities: an example from Istanbul, Turkey // *J. of Environmental Management*. 2008. V. 88. N 4. P. 970-983.
 27. *Zhu K.-Y., Yang S.-L.* Research review on Saaty's comments on fuzzy logic is not applicable to analytic hierarchy process // *Xitong Gongcheng Lilun yu Shijian / System Engineering Theory & Practice*. 2014. V. 34. N 1. P. 197-206. https://www.researchgate.net/publication/287315353_Research_review_on_Saaty%27s_comments_on_fuzzy_logic_is_not_applicable_to_analytic_hierarchy_process (дата обращения 09.01.2019).
 3. *Saaty, T.L.* Decision making with dependence and feedback. *The Analytic Network Process*. RWS Publications, 1996.
 4. *Alanbari, M.A., Al-Ansari, N., Jasim, H.K.* GIS and multicriteria decision analysis for landfill site selection in Al-Hashimiyah Qadaa. *Natural Science*, 2014, vol. 6, pp. 282-304.
 5. *Aragonés-Beltrán, P., Pastor-Ferrandoa, J.P., García-García, F., Pascual-Agulló, A.* An Analytic Network Process approach for siting a municipal solid waste plant in the Metropolitan Area of Valencia (Spain). *Journal of Environmental Management*, 2010, no. 91, pp. 1071-1086.
 6. *Aydi, A., Zairi, M., Dhia, H.B.* Minimization of environmental risk of landfill site using fuzzy logic, analytical hierarchy process, and weighted linear combination methodology in a geographic information system environment. *Environmental Earth Sciences*, 2013, vol. 68, no. 5, pp. 1375-1389.
 7. *Bottero, M., Ferretti, V.* An Analytic Network Process-based approach for location problems: The case of a new waste incinerator plant in the Province of Torino (Italy). *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2011, vol. 17, no. 3-4, pp. 63-84.
 8. *Chang, N.-B., Parvathinathan, G., Breeden, J.B.* Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management*, 2008, vol. 87, no. 1, pp. 139-153.
 9. *Coelho, L.M.G., Lange, L.C., Coelho, H.M.G.* Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods. *Waste Management & Research*, 2017, vol. 35, no. 1, pp. 3-28.
 10. *Djokanović, S., Abolmasov, B., Jevremović, D.* GIS application for landfill site selection: a case study in Pančevo, Serbia. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 2016, vol. 75, no. 3, pp. 1273-1299.
 11. *Eskandari, M., Homae, M., Mahmoodi, S., Pazira, E., Van Genuchten, M.Th.* Optimizing landfill site selection by using land classification maps. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, vol. 22, no. 10, pp. 7754-7765.
 12. *Ferretti, V., Pomarico, S.* Integrated sustainability assessments: a spatial multicriteria evaluation for siting a waste incinerator plant in the Province of Torino (Italy). *Environment Development & Sustainability*, 2012, vol. 14, no. 5, pp. 843-867.
 13. *Haruna, R.L., Alaga, T.A, Gajere, E.N, Chioma, U., Amos, S.I.* Landfill site selection for solid waste management in Karu Lga, Nasarawa state, Nigeria. *International Journal of Trend in Research & Development*, 2016, vol. 3, no. 6, pp. 436-467.
 14. *Josimović, B., Marić, I.* Methodology for the regional landfill site selection. *Sustainable Development – Au-*

REFERENCES

1. *Ortskhanov, T.A.* *Gradostroitelnye aspekty, napravlennye na obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti territorii razmeshcheniya poligonov TBO* [Town planning aspects aimed at ensuring the environmental safety of the MSW location territories]. *Akademiya. Arkhitektura i stroitelstvo*, 2010, no. 3, pp. 150-153. (in Russian).
2. *Saaty, T.L.* How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 1990, vol. 48, pp. 9-26.

- thoritative and Leading Edge Content for Environmental Management*. S. Curkovic, Ed. *IntechOpen*, 2012, pp. 513-538. http://cdn.intechopen.com/pdfs/38102/Intech-Methodology_for_the_regional_landfill_site_selection.pdf (accessed 09.01.2019).
15. Kaoutar, B., Lahcen, B. A decision support approach for optimized siting of municipal solid waste landfill case study Tangier Morocco. *International Journal of Engineering Research & Applications (IJERA)*, 2012, vol. 2, no. 6, pp. 1676-1684.
 16. Kara, C., Doratli, N. Application of GIS/AHP in siting sanitary landfill: a case study in Northern Cyprus. *Waste Management & Research*, 2012, vol. 30, no. 9, pp. 966-980.
 17. Kharat, M.G., Kamble, S.J., Raut, R.D., Kamble, S.S., Dhume, S.M. Modeling landfill site selection using an integrated fuzzy MCDM approach. *Modeling Earth Systems & Environment*, 2016, vol. 2, no. 2, article 53, 16 p.
 18. Kontos, T.D., Komilis, D.P., Halvadakis, C.P. Siting MSW landfills with a spatial multiple criteria analysis methodology. *Waste Management*, 2005, vol. 25, no. 8, pp. 818-832.
 19. Motlagh, Z.K., Sayadi, M.H. Siting MSW landfills using MCE methodology in GIS environment (Case study: Birjand plain, Iran). *Waste Management*, vol. 46, pp. 322-337.
 20. Nas, B., Cay, T., Iscan, F., Berkay, A. Selection of MSW landfill site for Konya, Turkey using GIS and multi-criteria evaluation. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2010, vol. 160, no. 1, pp. 491-500.
 21. Norese, M.F. ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localization of waste-treatment plans. *Land Use Policy*, 2006, vol. 23, no. 1, pp. 76-85.
 22. Poorna, A.C., Vinod, P.G. Solid waste disposal site selection by data analysis using GIS and Remote sensing tools: A case study in Thiruvananthapuram corporation area. *International Journal of Geomatics & Geosciences*, 2016, vol. 6, no. 4, pp. 1734-1747.
 23. Russo R. de F.S.M., Camanho R. Criteria in AHP: a systematic review of literature. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 55, pp. 1123-1132.
 24. Saaty, T.L., Tran, L.T. Fuzzy judgments and fuzzy sets. *International Journal of Strategic Decision Sciences*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 23-40.
 25. SuperDecisions / Expert Choice. <https://superdecisions.com/> (accessed 09.01.2019).
 26. Tuzkaya, G., Önüt, S, Tuzkaya, U.R., Gülsun, B. An analytic network process approach for locating undesirable facilities: an example from Istanbul, Turkey. *Journal of Environmental Management*, 2008, vol. 88, no. 4, pp. 970-983.
 27. Zhu, K.-Y., Yang, S.-L. Research review on Saaty's comments on fuzzy logic is not applicable to analytic hierarchy process. *Xitong Gongcheng Lilun yu Shijian / System Engineering Theory & Practice*, 2014, vol. 34, no. 1, pp. 197-206. https://www.researchgate.net/publication/287315353_Research_review_on_Saaty%27s_comments_on_fuzzy_logic_is_not_applicable_to_analytic_hierarchy_process (accessed 09.01.2019).

SELECTION OF SITES FOR ALLOCATION OF WASTE DISPOSAL OBJECTS BASED ON THE MULTICRITERIA DECISION-MAKING METHODS

© 2019 T. I. Yuganova^{1,*}

¹*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^{*}*E-mail: tigryu@gmail.com*

The problem of allocation of solid municipal waste (SMW) disposal objects is extremely acute for Russia. The complexity of such tasks is primarily due to their interdisciplinarity, i.e., a significant amount of social, economic and technical data and environmental information to be taken into account. In many countries, multi-criteria methods have been used for this purpose, which have proved their effectiveness, making it possible to work out a compromise and objective solution. The methods of T.L. Saaty - analysis of hierarchies (AHP) - and analysis of networks (ANP) are considered, as well as the examples of their use for choosing sites for landfills and waste incinerator plants.

Keywords: *MSW, waste disposal, site selection, multi-criteria methods, AHP, ANP.*

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019479-93>