

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ОТХОДОВ

Манжуров И.Л.¹, Берг Д.Б.^{1,2}, Коробицын Б.А.¹, Антонов К.Л.¹, Дерягина С.Е.¹, Астафьева О.В.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия (620219, г.Екатеринбург, ул.С.Ковалевской, д. 20), e-mail: mandzurov@mail.ru

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), e-mail: bergd@mail.ru

В работе предложен методический подход к решению задачи минимизации воздействия хозяйственной деятельности человека на окружающую среду. На примере реальных объектов обращения с отходами показаны возможности конструирования интегрального индекса экологической опасности из первичных индикаторов с использованием различных методик нормирования и агрегирования с последующим сравнением их информативности. Результаты расчетов подтвердили обоснованность выбора первичных индикаторов, пороговых значений и процедур создания обобщенного индекса потенциальной экологической опасности. Предложено использовать значение данного индекса для минимизации потенциальной экологической опасности при размещении отходов муниципалитета путем выбора между несколькими действующими объектами размещения, существенно отличающимися друг от друга значениями первичных индикаторов и сводных индексов.

Ключевые слова: рациональное природопользование; потенциальная экологическая опасность, оптимизация, управление отходами, размещение отходов, сводные индексы.

MINIMIZATION OF POTENTIAL ENVIRONMENTAL HAZARD IN WASTE DISPOSAL MANAGEMENT

Manzhurov I.L.¹, Berg D.B.^{1,2}, Korobitsyn B.A.¹, Antonov K.L.¹, Deryagina S.E.¹, Astafieva O.V.¹

¹Institute of Industrial Ecology, Ekaterinburg, Russia (620219, 20 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg), e-mail: mandzurov@mail.ru

²Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin», Ekaterinburg, Russia (620002, 19 Mira St., Ekaterinburg), e-mail: bergd@mail.ru

A methodological approach to the problem of minimization of the human activities impact on the environment is proposed. It shows, based on examples of actual waste disposal sites, the possibilities for development of integral index of ecological hazard from the initial indicators using different methods for normalization and aggregation with subsequent comparison of their informational quality. Results of the computations proved legitimacy of selection of the initial indicators, thresholds and procedures for development of the summary index of potential environmental hazard. It is proposed to use the value of this index to minimize the potential environmental hazard due to municipal locality waste disposal by choosing landfills between a few operated disposal landfills that are considerably different from each other in terms of values of the initial indicators and the summary indices.

Keywords: rational Use of natural resources, potential ecological hazard, optimization, waste management, waste disposal, summary indices.

Антропогенное воздействие на окружающую среду является естественным следствием хозяйственной деятельности человека, обеспечивающей существование человеческого общества. На современном уровне технологического и экономического развития такое воздействие часто наносит существенный ущерб окружающей среде и требует проведения соответствующих восстановительных мероприятий. Решение задачи

оптимизации хозяйственной деятельности человека требует количественной оценки ущерба и эффекта от восстановительных мероприятий. Традиционно используемых финансовых оценок недостаточно вследствие многообразия видов антропогенного воздействия на окружающую среду, представляющую собой взаимосвязанный комплекс природных сред (вода, воздух, почва) с растительным и животным миром.

В настоящее время оценку антропогенной нагрузки проводят по каждому загрязняющему веществу в отдельности на основании соответствующего количественного индикатора. Данные индикаторы часто объединяют в индексы для интегральной оценки степени негативного воздействия или, наоборот, качества окружающей среды.

Настоящая работа посвящена разработке методики расчета индекса потенциальной экологической опасности объектов размещения твердых бытовых отходов с целью его последующего использования в качестве критерия принятия решений в сфере управления отходами муниципального образования и решения задачи минимизации потенциальной экологической опасности. В работе использованы реальные данные по ряду муниципальных образований Ямало-Ненецкого автономного округа России.

Методика расчета индекса потенциальной экологической опасности

Известные рекомендации по выбору приоритетных показателей и созданию сводных индексов в различных сферах человеческой деятельности [5] предлагают следующую общую последовательность действий: 1) выработка теоретических оснований для формирования индекса; 2) выбор используемых для его расчета индикаторов – наборов данных; 3) восстановление пропущенных значений в данных; 4) многофакторный анализ совокупности данных с целью выяснение их внутренней структуры и взаимозависимости индикаторов; 5) представление значение исходных индикаторов в сопоставимом виде путем нормализации данных; 6) выбор весовых коэффициентов и агрегирование отдельных индикаторов в сводный индекс; 7) оценка чувствительности полученного сводного индекса к выбору схемы нормализации, восстановлению пропущенных данных, выбору весов и метода агрегирования индикаторов, исключению/добавлению индикатора к исходным данным и другим факторам; 8) выяснение относительной важности отдельных индикаторов, определяющих значение сводного индекса; 9) определение корреляции полученного сводного индекса с другими показателями, характеризующими описываемые объекты; 10) визуализация результатов.

При создании сводных индексов наиболее ответственными являются процедуры нормализации исходных данных (первичных индикаторов), выбора весовых коэффициентов и агрегирования. Именно они способны оказать наибольшее влияние на абсолютную величину итогового сводного индекса и на результаты ранжирования исследуемых объектов.

Нормализация данных выполняется перед их агрегированием, т.к. индикаторы, входящие в исходные наборы данных, обычно имеют различные единицы измерений. Наиболее распространенные методы нормализации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Наиболее распространенные методы нормализации

Метод/пример использования	Формула
1. Ранжирование / <i>the Information and Communications Technology Index</i> [4], <i>the Medicare Study on Healthcare Performance across the United State</i> [7]	$I_{q,c}^t = \text{Rank}(x_{q,c}^t)$
2. Стандартизация	$I_{q,c}^t = \frac{x_{q,c}^t - x_{q,c=\bar{c}}^t}{\sigma_{q,c=\bar{c}}^t}$
3. Минимаксный / <i>Human Development Index</i> [6].	$I_{q,c}^t = \frac{x_{q,c}^t - \min_c(x_q^{t_0})}{\max_c(x_q^{t_0}) - \min_c(x_q^{t_0})}$
4. Расстояние до базового (эталонного) объекта	$I_{q,c}^t = \frac{x_{q,c}^t}{x_{q,c=\bar{c}}^{t_0}}$ или $I_{q,c}^t = \frac{x_{q,c}^t - x_{q,c=\bar{c}}^{t_0}}{x_{q,c=\bar{c}}^{t_0}}$
5. Категориальная шкала	$I_{q,c}^t = \begin{cases} 0 & \text{если } x_{q,c}^t < P^{15} \\ 20 & \text{если } P^{15} \leq x_{q,c}^t < P^{25} \\ 40 & \text{если } P^{25} \leq x_{q,c}^t < P^{65} \\ 60 & \text{если } P^{65} \leq x_{q,c}^t < P^{85} \\ 80 & \text{если } P^{85} \leq x_{q,c}^t < P^{95} \\ 100 & \text{если } P^{95} \leq x_{q,c}^t \end{cases}$
6. Нормализация на основании отклонения от среднего / <i>Summary Innovation Index</i> [3]	$I_{q,c}^t = \begin{cases} 1 & \text{если } w > (1+p) \\ 0 & \text{если } (1-p) \leq w \leq (1+p) \\ -1 & \text{если } w < (1-p) \end{cases}$ где $w = x_{q,c}^t / x_{q,c=\bar{c}}^{t_0}$

Примечание: здесь $x_{q,c}^t$ – значение частного индикатора q для объекта c в момент времени t ; \bar{c} – значение частного индикатора для объекта, выбранного в качестве реперного. P^i – i -я процентиль распределения индикатора $x_{q,c}^t$, p – произвольно выбранное допустимое отклонение от среднего.

Выбор наилучшего метода нормализации является нетривиальной задачей. При выборе метода нормализации следует обращать внимание на свойства исходных данных и на то, с какой целью создается сводный индекс. Необходимо проводить тесты на устойчивость, чтобы определить, как свойства исходных данных и выбор процедуры нормализации влияют на конечный результат.

Большинство сводных индексов строятся с использованием равных весов, когда всем индикаторам-переменным присваиваются одинаковые весовые коэффициенты. Такой подход предполагает, что все переменные, используемые для построения сводного индекса, одинаково значимы, но также он может скрывать отсутствие статистического или эмпирического базиса для выбора весов, т.е. когда недостаточно знаний о связях между компонентами или когда экспертам не удастся достичь консенсуса. В любом случае этот

подход не означает отказ от процедуры взвешивания, а просто предполагает, что все веса одинаковы.

Методы агрегирования, наиболее часто используемые при создании сводных индексов, – это метод линейного агрегирования и метод геометрического агрегирования. И при линейном, и при геометрическом агрегировании, весовые коэффициенты отражают результат компромиссного выбора между индикаторами.

Отсутствие «объективных» методов для выбора весовых коэффициентов и способа агрегирования не обязательно ведет к отказу от обоснованности сводных индексов, по крайней мере, до тех пор, пока этот процесс остается прозрачным. Цели, которые преследует разработчик, должны быть ясно объявлены на начальном этапе, а выбранные методы должны быть протестированы для того, чтобы удостовериться, в какой мере эти цели были достигнуты.

Возможности использования сводных индексов в области охраны окружающей среды в данной работе продемонстрированы на примере задачи управления отходами. Как известно, не утилизируемые твердые бытовые отходы размещаются на специальных полигонах, наносящих определенный ущерб окружающей среде. Виды и возможная степень ущерба могут быть различны, поэтому для оценки экологической опасности каждого объекта размещения отходов для окружающей среды вводится соответствующий интегральный индекс. Он формируется на основании первичных индикаторов, каждый из которых соответствует одному из видов возможного негативного воздействия объекта размещения отходов на окружающую среду.

В данной работе интегральный индекс потенциальной экологической опасности рассчитывается на основании следующего набора первичных индикаторов потенциальной экологической опасности I_i , составленного экспертным методом с использованием результатов, опубликованных в работах [2, 1]:

I_1 : площадь объекта, га;

I_2 : ширина санитарно-защитной зоны, м;

I_3 : вместимость объекта, т;

I_4 : мощность объекта, т/год;

I_5 : количество накопленных отходов, т;

I_6 : количество систем защиты окружающей среды на объекте, ед.;

I_7 : количество систем мониторинга окружающей среды на объекте, ед.;

I_8 : расстояние до ближайшего водного объекта, км;

I_9 : расстояние до ближайшего населенного пункта, км;

I_{10} : ожидаемое время до заполнения объекта, лет. $I_{10} = (I_3 - I_5) / I_4$.

Для расчета значения индекса потенциальной экологической опасности J использовались следующие методы:

- 1) индекс $J1(LA)$ – нормализация методом ранжирования, линейное агрегирование с равными весами;
- 2) индекс $J2a(LA)$ – нормализация методом стандартизации без корректировки выбросов, линейное агрегирование с равными весами;
- 3) индекс $J2b(LA)$ – нормализация методом стандартизации с корректировкой выбросов, линейное агрегирование с равными весами;
- 4) индекс $J3a(LA)$ – нормализация минимаксным методом без корректировки выбросов, линейное агрегирование с равными весами;
- 5) индекс $J3b(LA)$ – нормализация минимаксным методом с корректировкой выбросов, линейное агрегирование с равными весами;
- 6) индекс $J3a(GA)$ – нормализация минимаксным методом без корректировки выбросов, геометрическое агрегирование с равными весами;
- 7) индекс $J4(LA)$ – нормализация с использованием категориальной шкалы, основанной на процентилях распределения, линейное агрегирование с равными весами;
- 8) индекс $J5(LA)$ – нормализация на основании отклонения от среднего значения, линейное агрегирование с равными весами.

Индексы могут принимать значения в диапазоне от 0 до 1; большему значению индекса соответствует более высокая потенциальная опасность объекта размещения отходов. Рассчитав значения индексов потенциальной экологической опасности для каждого из объектов размещения отходов на территории конкретного муниципального образования или автономного округа в целом, можно ранжировать объекты размещения отходов по степени их потенциальной экологической опасности.

Оценка потенциальной экологической опасности объектов размещения отходов

В таблице 2 представлены результаты ранжирования ряда объектов размещения отходов (ОРО) муниципальных образований Ямало-Ненецкого автономного округа, выполненного с использованием упомянутых выше методов. Большой ранг соответствует большей потенциальной экологической опасности.

Результаты ранжирования показывают, что разброс ранговых мест, определенных при помощи разных индексов, может быть значителен, но в то же время наблюдается очевидная тенденция, позволяющая уверенно разделять наиболее и наименее опасные объекты размещения отходов. Все методы одинаково надежно и непротиворечиво позволяют выявлять объекты размещения отходов, представляющих наибольшую потенциальную опасность для окружающей среды и здоровья населения, рис. 1. На этом рисунке

представлены ранговые места, рассчитанные с помощью различных методов, для ОРО, расположенных в нижней трети списка, т.е. имеющих наибольший ранг и представляющих наибольшую потенциальную угрозу. Поэтому для выявления объектов размещения отходов, представляющих наибольшую потенциальную опасность для окружающей среды и здоровья населения, можно использовать любой из рассмотренных выше методов.

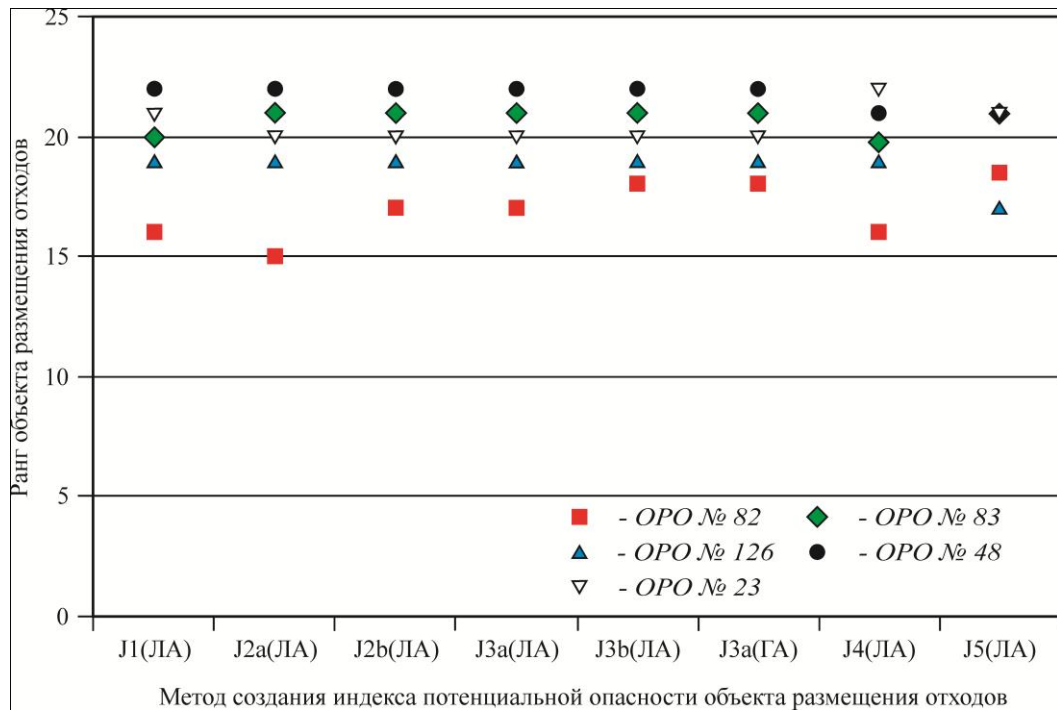


Рис. 1. Рассчитанные с помощью различных методов ранговые места для ОРО, расположенных в нижней трети списка, т.е. имеющих наибольший ранг и представляющих наибольшую потенциальную угрозу

Таблица 2

Результаты ранжирования ОРО муниципальных образований Ямало-Ненецкого автономного округа по индексу потенциальной экологической опасности, рассчитанного различными методами

Муниципальное образование	№ ОРО	Ранговое место ОРО, определенное на основании значения индекса потенциальной экологической опасности							
		<i>J1(ЛA)</i>	<i>J2a(ЛA)</i>	<i>J2b(ЛA)</i>	<i>J3a(ЛA)</i>	<i>J3b(ЛA)</i>	<i>J3a(ГA)</i>	<i>J4(ЛA)</i>	<i>J5(ЛA)</i>
Надымский р-н	80	2	7	7	8	9	1	2	4-6
Тазовский р-н	8	5,5	9	9	7	10	7	6	9-15
Красноселькупский р-н	367	1	1	1	1	1	5	1	2
Тазовский р-н	366	3	5	5	5	3	6	5	4-6
Ямальский р-н	362	7	4	4	4	5	8	8	3
г. Ноябрьск	92	13	12	11	13	14	16	13	9-15
Пуровский р-н	133	11	6	6	6	7	10	10	4-6
Тазовский р-н	9	5,5	11	8	10	8	3	7	9-15
Ямальский р-н	363	9	13	13	12	16	4	12	9-15
Надымский р-н	81	8	2	2	2	4	9	3	7-8
Тазовский р-н	102	15	16	12	16	15	17	15	9-15
Надымский р-н	93	4	10	14	9	12	2	4	9-15
Пуровский р-н	364	10	3	3	3	2	13	11	1
г. Новый Уренгой	126	19	19	19	19	19	19	19	17
Пуровский р-н	132	12	8	10	11	11	12	9	7-8
Пуровский р-н	131	14	18	15	14	6	14	14	9-15
Тазовский р-н	365	18	17	16	15	13	15	17	16
г. Ноябрьск	83	20	21	21	21	21	21	20	20-22
г. Ноябрьск	82	16	15	17	17	18	18	16	18-19
г. Губкинский	27	17	14	18	18	17	11	18	18-19
Тазовский р-н	23	21	20	20	20	20	20	22	20-22
г. Новый Уренгой	48	22	22	22	22	22	22	21	20-22

С учетом недостатков, присущих в той или иной степени каждому из методов ранжирования (ранговая нормализация и нормализация с использованием категориальной шкалы ведут к потере информации об абсолютных значениях первичных индикаторов; значения индексов, построенных с использованием геометрического агрегирования очень чувствительны к наличию близких к нулю значений исходных данных,), для ранжирования объектов размещения отходов наиболее подходящим представляется метод, основанный на использовании индекса потенциальной опасности $I3a(LA)$. Этот индекс рассчитывается методом минимаксной нормализации с линейным агрегированием и использованием равных весовых коэффициентов без удаления «выбросов».

Как видно из рисунка 1, этот метод дает результаты, хорошо согласующиеся с результатами, полученными другими методами. При этом он не дает резких «выбросов» и результатов, сильно отличающихся от основного тренда. Еще одним преимуществом этого метода является то, что он позволяет проводить «дезинтеграцию» итогового сводного индекса, разлагая его на исходные составляющие, и выявлять факторы, в наибольшей степени влияющие на его абсолютную величину.

Использование индекса потенциальной экологической опасности для оптимизации размещения отходов

Рассмотрим задачу размещения отходов муниципального образования в течение 5 лет на примере г. Ноябрьск. Этому муниципалитету с населением около 110 тыс. чел. ежегодно требуется утилизировать более 30 тыс. т твердых бытовых отходов на трех доступных объектах размещения отходов: № 82, № 83 и № 92 (см. таблицу 2). Значения первичных индикаторов этих объектов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Индикаторы потенциальной экологической опасности объектов размещения отходов г. Ноябрьск, ЯНАО (по состоянию на 01.01.2011 г.)

Наименование индикатора	Объект размещения отходов		
	82	83	92
I_1 : площадь объекта, га	14,59	26,82	6,21
I_2 : ширина санитарно-защитной зоны, м	50	500	500
I_3 : вместимость объекта, т	525 780	959 570	171,090
I_4 : мощность объекта, т/год	29 210	47 979	30,150
I_5 : количество накопленных отходов, т	469 598	152 212	50 497
I_6 : количество систем защиты окружающей среды на объекте, ед.	6	5	6
I_7 : количество систем мониторинга окружающей среды на объекте, ед.	3	3	3
I_8 : расстояние до ближайшего водного объекта, км	9	1,25	3,0
I_9 : расстояние до ближайшего населенного пункта, км	3,5	2,4	1,3
I_{10} : ожидаемое время до заполнения объекта, лет	1,9	16,8	4

Для дальнейшего исследования был использован индекс потенциальной экологической опасности $I3b(LA)$ – нормализация минимаксным методом с корректировкой выбросов, линейное агрегирование с равными весовыми коэффициентами, равными 0,1:

$$J3b(LA) = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{j=10} I_j \quad (1)$$

Значения этого индекса были спрогнозированы для каждого из трех ОРО на 4-х летний период путем приращения значений индикатора I_5 (количество накопленных отходов) на 30 тыс. и соответствующего изменения значений индикатора I_{10} (ожидаемое время до заполнения объекта). Были рассчитаны значения индексов как для каждого из рассматриваемых ОРО отдельности ${}^i J3b(LA)$, так и их суммарное значение $\Sigma J3b(LA)$ для получения интегральной оценки экологической опасности всех ОРО муниципалитета (рис. 2):

$$\Sigma J3b(LA) = {}^{82} J3b(LA) + {}^{83} J3b(LA) + {}^{92} J3b(LA) \quad (2)$$

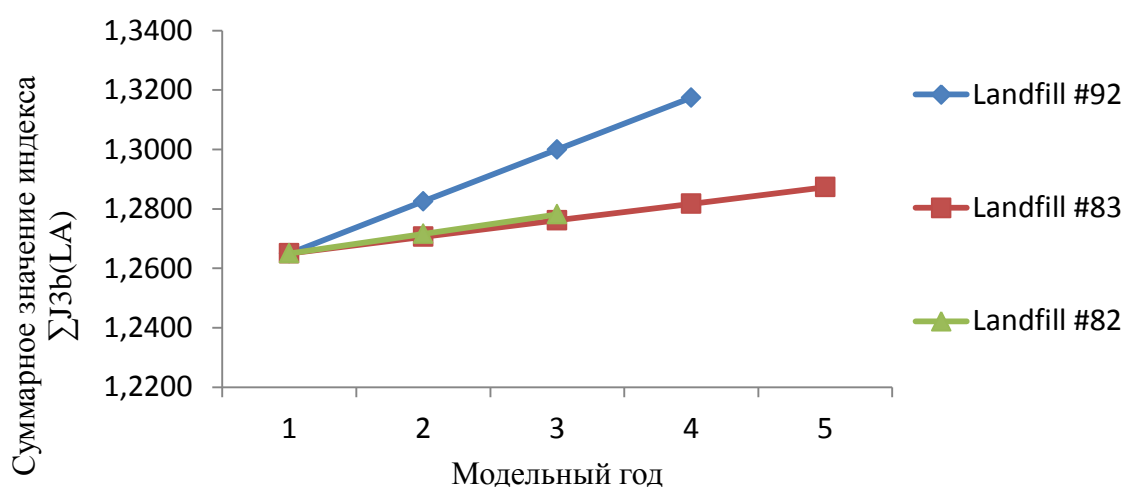


Рис. 2. Прогнозные значения суммарного индекса потенциальной экологической опасности $\Sigma J3b(LA)$ для ОРО г. Ноябрьск на 4-х летний период при условии использования только одного из трех объектов размещения отходов

Прогнозные значения суммарного индекса $\Sigma J3b(LA)$ (рис. 2) рассчитаны для трех различных сценариев, в каждом из которых отходы размещаются только на одном из объектов, два остальных остаются без изменений. Видно, что при размещении отходов только на объекте № 92 ежегодный прирост значения суммарного индекса $\Sigma J3b(LA)$ оказывается наибольшим, поэтому данный сценарий следует отклонить как создающий наибольшую потенциальную экологическую опасность.

При размещении отходов на объектах № 82 и № 83 по отдельности прирост значений суммарного индекса $\Sigma J3b(LA)$ практически одинаков, однако по истечении первых двух лет объект № 82 оказывается заполненным полностью. В последующем размещение отходов на нем становится невозможным, а он сам должен быть рекультивирован. После рекультивации объект № 82 перестает представлять потенциальную экологическую опасность, поэтому значение его индекса ${}^{82} J3b(LA)$ становится нулевым и общее значение суммарного индекса

$\Sigma J3b(LA)$, рассчитанного по формуле (2), должно существенно снизиться. Однако рекультивация требует существенных дополнительных финансовых затрат, что не обеспечивает равных условий для реализации и сравнения этих сценариев.

Поэтому при прочих равных условиях оптимальным будет размещение отходов только на объекте № 83. Включение в условие задачи финансовых показателей (стоимость рекультивации, стоимость размещения отходов на каждом из объектов и стоимость их содержания, доступные муниципалитету финансовые средства на эти цели) может изменить предлагаемое оптимальное решение.

Выводы и заключение

Таким образом, в настоящей работе:

- представлены и кратко обсуждены основные математические методы нормализации исходных данных, позволяющие конструировать обобщенные индексы путем агрегирования исходных индикаторов.
- представлен перечень исходных индикаторов потенциальной экологической опасности для объектов размещения отходов в Ямало-Ненецком автономном округе (по данным на 2011 г.) для расчета значений интегрального индекса;
- проведено сравнение расчетов интегрального индекса потенциальной экологической опасности пятью различными методами нормализации в нескольких модификациях и двумя методами агрегирования, которое показало устойчивость получаемых результатов для наиболее опасных объектов (находящихся в нижней трети списка) независимо от используемого метода;
- показана возможность использования интегрального индекса потенциальной экологической опасности для минимизации потенциальной экологической опасности при размещении отходов муниципалитета путем выбора между несколькими действующими объектами размещения, существенно отличающимися друг от друга значениями первичных индикаторов и сводных индексов.

Предполагается продолжение исследований в данном направлении с целью разработки методических рекомендаций для муниципальных органов власти по оптимизации размещения отходов на основании интегрального индекса потенциальной экологической опасности с учетом реальных финансовых ограничений.

Работа выполнена при поддержке Программы ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН, проект 13-27-008-СГ.

Список литературы

1. Волынкина Е.П. Инвентаризация свалок ТБО в России и оценка их метанового потенциала//Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». http://esco-ecosys.narod.ru/2010_12/art124.htm (дата обращения: 15.11.2011).
2. Гуман О.М. Эколого-геологические условия полигонов твердых бытовых отходов Среднего Урала. Автореф. дис. докт. геолого-минералогических наук. – Екатеринбург, 2009. – 42 с.
3. European Commission, *Summary Innovation Index*, DG ENTR, Brussels. <http://www.proinno-europe.eu/page/summary-innovation-index-0> (дата обращения: 25.02.2014).
4. Fagerberg J. (2001), in Lundvall B. and Archibugi D. (eds.) *Europe at the crossroads: The challenge from innovation-based growth in the Globalising Learning Economy*, Oxford Press.
5. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and user guide* – OECD, 2008. – 163 p.
6. *Human Development Report 2011. Sustainability and Equity: A Better Future for All.* – NY.: United Nation Development Programme, 2011. – 185 p.
7. Jencks S.F., Huff E.D. and Cuerdon T. (2003), Change in the quality of care delivered to Medicare beneficiaries, 1998-1999 to 2000-2001, *Journal of the American Medical Association*, 289(3): 05-12.

Рецензенты:

Никонов О.И., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой Анализа систем и принятия решений департамента Бизнес-информатики и математического моделирования Высшей школы экономики и менеджмента ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Мартюшев Л.М., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики и экологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.