

УДК 504.064.36:504.064.47(470.23):504.064.2.001.18

*В.В. Кулибаба, В.В. Петухов*

## **МОНИТОРИНГ ОБОРОТА МУНИЦИПАЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В РЕГИОНЕ**

*V.V. Kulibaba, V.V. Petuhov*

### **REGIONAL MUNICIPAL WASTES MANAGEMENT SYSTEM**

В статье проанализированы результаты и проблемы мониторинга оборота муниципальных твердых бытовых отходов в Ленинградской области за 5 лет, отражена специфика региона: неравномерное распределение объемов образующихся твердых бытовых отходов, сезонный тренд, устойчивое увеличение количества самовольных свалок и др. Рассмотрены возможности автоматизации обнаружения мест несанкционированного размещения отходов, моделирование оптимальной сети объектов обращения с отходами с учетом экологических ограничений, транспортно-логистической и сезонной зависимости.

ТВЕРДЫЕ БЫТОВЫЕ ОТХОДЫ. МОНИТОРИНГ. ЛОГИСТИКА. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ.

The paper deals with current status and perspectives of municipal wastes management and monitoring system for Leningrad oblast. Covered some aspects of illegal waste dumps identification, wastes transport logistics, determination of most suitable places for new landfills allocation constrained by ecological requirements.

MUNICIPAL WASTES. WASTE MANAGEMENT SYSTEM. LOGISTICS. MODELING. DECISION SUPPORT.

Изменение структуры потребления в стране вызвало значительный рост объема бытовых отходов, что резко увеличило нагрузки на всю инженерно-надзорную систему утилизации отходов в Ленинградской области. Твердые бытовые отходы (ТБО) стали ведущим фактором несанкционированного загрязнения территории Ленинградской области, причем для нее характерны выраженная пространственная концентрация зон с высокой плотностью образования ТБО и значительные зоны с низкой удельной нагрузкой (рис. 1).

Основные задачи системы мониторинга:

организация единой базы сбора и обработки данных по обороту муниципальных ТБО;

формирование набора наблюдаемых параметров, обеспеченных статистическими данными за длительный период времени и не требующих значительных финансовых затрат на их получение;

организация хранения и оперативной обработки данных; обеспечение достоверности и сопоставимости исходных данных;

оценка эксплуатационного ресурса объектов, где размещаются отходы;

учет обеспеченности муниципальных бюджетов средствами на утилизацию ТБО;

беспорный юридический статус первичной информации;

организация обратных связей.

Опыт эксплуатации показал, что система мониторинга должна включать два основных модуля: «Мониторинг оборота ТБО» (обеспечивает ввод, хранение и обработку поквартальных статистических данных по параметрам оборота ТБО) и «Геоинформационные приложения» (обеспечивает пространственную визуализацию и картометрическую обработку информации в масштабах 1: 500 000 и 1: 100 000).

Анализ данных по обороту отходов выявил значительный недоучет объемов образования ТБО населением и четко выраженную сезонность (рис. 2): наибольший объем фиксируется в весенне-летнем периоде, минимум — в первом квартале года. Этот фактор должен учитываться при проектировании санитарных схем очистки

территорий и размещении перегрузочных станций. Среднегодовой объем муниципальных ТБО по области за период наблюдений составил  $2630 \pm 95$  тыс. м<sup>3</sup>, среднеквартальный объем за теплый период —  $675,2 \pm 11,9$  тыс. м<sup>3</sup>, за холодный период —  $619 \pm 14,1$  тыс. м<sup>3</sup>. Причем выявлен достоверный тренд прироста объемов образования ТБО с годовым коэффициентом 1,02. Морфологический состав отходов в эти периоды тоже существенно различается [2, 5].

Выявлен также устойчивый рост количества несанкционированных свалок, основная часть которых — самовольные очаги стихийного размещения бытовых отходов, представляющие собой хаотическое нагромождение бытового мусора на локальных участках (закрытые карьеры, полосы отвода автомобильных дорог, лесные дороги, пустыри у населенных пунктов и т. п.). Как правило, такие свалки имеют горизонтальное простирание, малые высоты навалов (1,5–2 м), небольшие площади. Данные мониторинга самовольных свалок позволили ранжировать величины ущерба от самовольного размещения ТБО как по балансу образования и ликвидации самовольных свалок, так и по алгоритмам нормативных методик. Распределение, в %, самовольных свалок (числом  $N = 281$ ) по категориям земель в среднем по региону за 2007–2012 годы следующее:

Тип земель	%
Земли муниципальных поселений и населенных пунктов .....	20,5
Лесной фонд .....	12,5
Земли транспорта (полосы отвода автодорог) .....	21
Земли обороны .....	1,5
Земли сельскохозяйственного назначения .....	15,5
Группы и виды земель защитного статуса .....	5,4
Прочие .....	12,1

В процессе эксплуатации региональной системы мониторинга оборота муниципальных ТБО определились следующие основные направления ее развития и формирования на этой основе системы подготовки принятия решений (СППР) для повышения качества и эффективности управления оборотом ТБО:

- 1) автоматизация обнаружения мест самовольного размещения отходов для оперативного принятия неотложных мер по их ликвидации;
- 2) моделирование оптимальной сети объектов обращения с отходами с учетом экологических и транспортно-логистических ограниче-

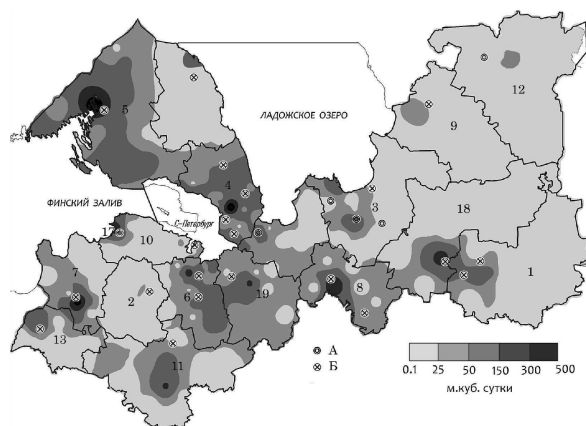


Рис. 1. Плотность образования ТБО

по территории области приведенная к м<sup>3</sup>/сутки: 1–18 — районы ЛО; А — свалки и полигоны без регистрации в ГРОРО; Б — полигоны с регистрацией в ГРОРО)

ний, в том числе возможность организации двухуровневой системы обращения с отходами на территориях пониженной транспортной доступности (около 26 % территории области);

3) подготовка картографической основы (ГИС-слоев) для учета экологических ограничений при определении мест размещения новых объектов обращения с отходами, в том числе и полигонов.

Структура СППР приведена на рис. 3. База геоданных содержит информацию обо всех объектах размещения и утилизации отходов (действующих, закрытых, рекультивированных), местах самовольного размещения ТБО, экологических ограничениях на размещение полигонов, а также слою общегеографической информации. Прикладные программы СППР обеспечивают:

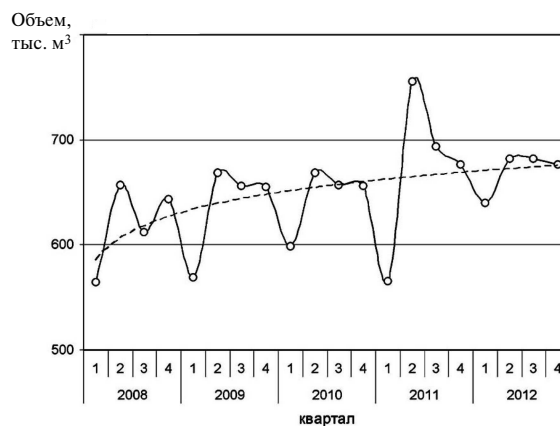


Рис. 2. Динамика образования ТБО в регионе

преобразование, анализ, сопоставление, выполнение и фильтрацию данных;  
 моделирование сети объектов обращения с отходами по выбранным сценариям с учетом экологических ограничений и транспортной логистики;  
 формирование слоев экологических ограничений.

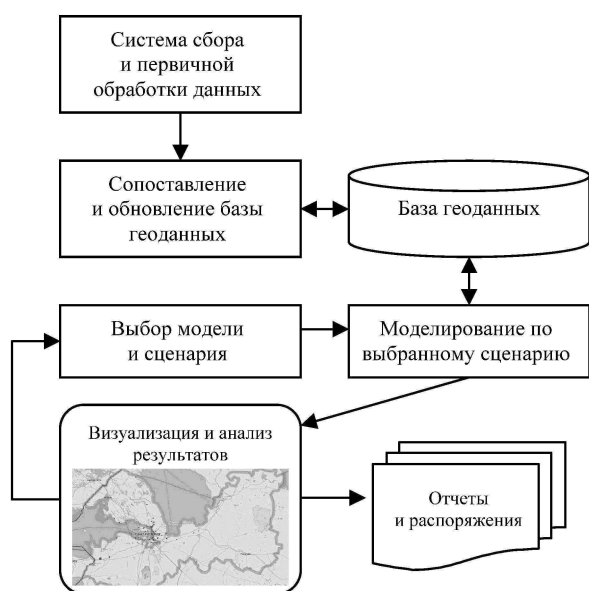


Рис. 3. Блок-схема системы подготовки принятия решений

**Задача обнаружения самовольных и нелегальных свалок** достаточно сложная, поскольку распознавание сравнительно небольших объектов на спутниковых снимках крайне затруднительно. Между тем они составляют в количественном отношении около 35 % от общего числа свалок, о чем говорят следующие данные о площадях мест размещения отходов:

Площадь объектов, га	% от общего числа свалок
менее 0,001 .....	12,5
0,001–0,01 .....	8,6
0,01–0,1 .....	12,1
0,1–1 .....	34,7
1–10 .....	26,1
более 10 .....	6,0

Одним из источников данных, позволяющих частично решить проблему автоматизации обнаружения мест несанкционированного размещения ТБО, служит регулярно обновляемый

web-ресурс по сбору и распространению открытых географических данных — краудсорсинговый проект OpenStreetMap [4]. Ленинградская область — один из регионов, где активность по выявлению самовольных свалок наиболее высока (рис. 4).

Недостатком является низкая достоверность количественных показателей предоставляемых данных, что требует перепроверки на местах (в муниципальных образованиях).

Другая решаемая проблема управления показателями экологической безопасности территории — определение участков для размещения новых объектов обращения с отходами и моделирование оптимальной сети этих объектов.

Сложность моделирования обусловлена неравномерной пространственной плотностью образования отходов, разной степенью развитости дорожной сети, неравномерным распределением санкционированных мест размещения отходов, сезонным изменением объема образования отходов (см. рис. 2), разбросом тарифов на вывоз отходов.

Перечисленные факторы осложняют формирование экономически эффективных транспортно-логистических схем сбора и вывоза отходов. Транспортировку ТБО следует рассматривать как относительно автономный инфраструктурный комплекс утилизации ТБО, где хозяйствующие субъекты ориентированы прежде всего на получение прибыли, а потому этот комплекс должен регулироваться экономическими методами.

Транспортное обслуживание оказывает значительное влияние на эффективность всего процесса обращения с ТБО, зачастую от его качества зависит количество самовольных мест размещения ТБО. В целом по области преобладает схема транспортировки «одно поселение — один перевозчик». Организаций, осуществляющих вывоз ТБО по эффективным радиальным транспортным схемам, замкнутым на один полигон, немного.

Решение логистических задач (транспортировка ТБО до мест их переработки или размещения) — одна из важных составляющих системы обращения с отходами, обладающая рядом специфических свойств. Затраты на транспортировку сильно зависят от пространственной структуры региона и существенно влияют на экономиче-

скую эффективность региональной системы обращения с отходами. Затраты на вывоз ТБО — от 80 до 550 руб./м<sup>3</sup> в отдельных поселениях. Без развития сети малообъемных станций перегруза и мусоросортировочных комплексов, т. е. использования двухэтапной системы транспортировки отходов, данную проблему в ближайшей перспективе решить, к сожалению, нельзя.

К типовым сценариям моделирования и задачам логистики при принятии решений относятся:

определение места постройки нового объекта;

создание новой сети размещения объектов обращения с отходами и сопоставление результатов с существующей сетью (в пределах одного района, в двух-трех смежных районах);

целесообразность организации двухэтапной схемы вывоза отходов;

пересчет логистики при изменении количества проектируемых объектов;

расчет схемы маршрутов при ликвидации незаконных свалок.

Критерием поиска оптимального решения в представленных задачах принята минимизация суммарного грузооборота твердых бытовых отходов при перевозке от мест образования/сбора к местам утилизации с учетом экологических требований.

В качестве метода решения перечисленных задач предложена модель  $p$ -медианы, применяемая во многих приложениях для решения аналогичной задачи, например при размещении предприятий бытового обслуживания, складов, пунктов автосервиса на дорогах, коммутаторов телефонной сети и другие [1, 6–9]. Данная модель позволяет учесть как структуру дорожной сети региона, так и дифференциацию населенных пунктов по объемам производства отходов. Также существует возможность наложить огра-

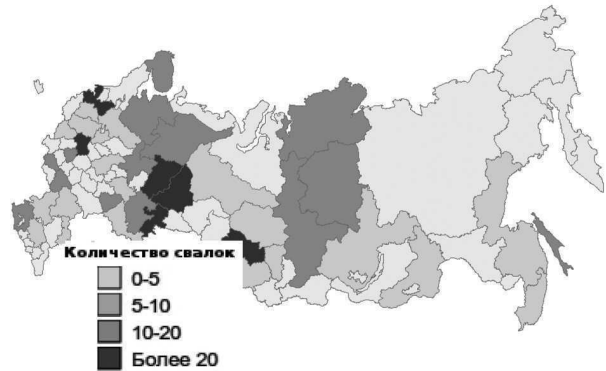


Рис. 4. Распределение обнаруженных мест размещения ТБО по субъектам РФ

ничение на возможные районы размещения объектов через сокращение множества вершин, проверяемых на принадлежность  $p$ -медиане, что является крайне важным, поскольку действующие санитарно-гигиенические правила накладывают ограничения на возможные места расположения новых объектов размещения твердых бытовых отходов. Кроме того, в модели можно не учитывать стоимости на открытие (создание) предприятий, задавать ограничение на число объектов, которые могут быть открыты.

Задача о нахождении  $p$ -медианы графа  $G$  — это задача о размещении заданного числа пунктов обслуживания (рис. 5), при которых сумма кратчайших расстояний от вершин графа до ближайших пунктов принимает минимально возможное значение.

Определим передаточные числа вершин  $x_j \in X$  графа  $G$ :

$$s_0(x_i) = \sum_{x_j \in X} v_j d(x_i, x_j); \quad (1)$$

$$s_i(x_i) = \sum_{x_j \in X} v_j d(x_j, x_i), \quad (2)$$

где  $v_j d(x_i, x_j)$  — взвешенная длина пути между  $x_i$  и  $x_j$ .

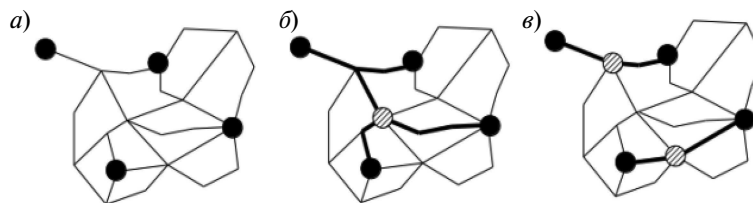


Рис. 5. Размещение  $p$ -медиан на дорожном графе

(● — пункты-клиенты; ⊘ — оптимальные пункты обслуживания; — — дорожная сеть; — — оптимальные маршруты)

Внешней медианой графа называется вершина  $\bar{x}_0$ , для которой

$$s_0(\bar{x}_0) = \min_{x_i \in X} [s_0(x_i)]. \quad (3)$$

Внутренней медианой графа называется вершина  $\bar{x}_0$ , для которой

$$s_i(\bar{x}_i) = \min_{x_i \in X} [s_i(x_i)] \quad (4)$$

Применительно к проблеме поиска оптимального расположения объектов переработки и размещения твердых бытовых отходов при проектировании сети этих объектов во множестве точек внешней  $p$ -медианы (3) дорожного графа минимизируется суммарное расстояние до всех «производителей» ТБО; во множестве точек внутренней  $p$ -медианы (4) минимизируется суммарное расстояние от всех «производителей» отходов.

Если за вес вершин графа принять объем образования отходов в этих пунктах, а за вес дуг — фактическое расстояние по дорожной сети между инцидентными ей вершинами, то передаточное число будет выражать потенциальный грузооборот в системе в том случае, если в представленном подмножестве вершин будут расположены объекты размещения отходов. Таким образом, в подобной формулировке задачи критерием оптимизации будет грузооборот и задача оптимизации будет заключаться в поиске на дорожном графе  $p$ -медиан, на которых достигается минимум грузооборота в системе. Учет природоохранных и санитарно-гигиенических критериев осуществляется заданием ограничений на места расположения объектов размещения отходов. Допустимым множеством значений целевой функции примем множество вершин дорожного графа, которое лежит вне запрещенных территорий.

В качестве примера рассмотрим решение задачи оптимального размещения нового полиго-

на в уже существующей сети. Пусть  $P$  — множество существующих объектов размещения отходов в регионе. Требуется найти на графе  $G$  вершину  $x'_p$  такую, что

$$s_0(\bar{X}_p) = \min_{X_i \in (P \cup x'_p)} [s_0(X_p)]. \quad (7)$$

Полученная таким образом точка на графе будет тем местом строительства нового объекта размещения отходов, в котором суммарный грузооборот будет минимальным.

Важно отметить, что на методе  $p$ -медиан основаны современные модели, при помощи которых можно решать крайне важные проблемы размещения объектов обращения с отходами — поиск оптимального размещения пунктов уплотнения ТБО и задачу о конкурентном размещении объектов (сравнение различных стратегий развития системы как единой системы обращения с отходами и совокупности независимых комплексов).

Задача унификации информационного мониторинга и комплексного анализа оборота муниципальных ТБО в регионе решается впервые. Развитие информационно-аналитической поддержки для автоматизации таких задач, как обнаружение мест несанкционированного размещения отходов, расчет схем транспортной логистики при их ликвидации, моделирование сети объектов размещения отходов с учетом экологических ограничений и минимизации транспортных затрат, обеспечивает решение задач оптимизации и контроля за оборотом ТБО на муниципальном уровне.

Результаты моделирования подтверждают целесообразность использования открытых источников регулярно обновляемых данных для идентификации мест самовольного размещения отходов и внедрения двухэтапной логистической схемы вывоза отходов в зонах с низкими показателями образования ТБО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алексеева, Е.В.** Генетический локальный поиск для задачи о  $p$ -медиане с предпочтениями клиентов [Текст] / Е.В. Алексеева, Ю.А. Кочетов // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2.— 2007.— С. 3—31.

2. **Венцолис, Л.С.** Системы обращения с отходами: принципы организации и критерии [Текст] /

Л.С. Венцолис, Ю.И. Скорик, Т.М. Флоринская.— СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2007.— 207 с.

3. **Кристофидес, Н.** Теория графов. Алгоритмический подход [Текст] / Н. Кристофидес.— М.: Мир, 1978.— 432 с.

4. Картографический ресурс: сайт Openstreetmap [Электронный ресурс] URL: <http://www.openstreetmap.org>

5. О состоянии окружающей среды в Ленинградской области [Текст] // Информационно-аналитический сборник Комитета по природным ресурсам Ленинградской области.— СПб., 2010.— 334 с.

6. **Avella, I.** A branch-and-cut algorithm for the median-path problem [Текст] / I. Avella, M. Boccia, A. Sforza, I. Vasil'ev // Computational Optimization and Applications.— 2005. №32.— С. 215–230.

7. **Cooper, L.** Location-allocation problems [Текст] / L. Cooper // Operations Research.— 1963. №11.— P. 331–343.

8. **Goldman, A.J.** A domination theorem for optimal locations [Текст] / A.J. Goldman, P.R. Mayers // Operations Research.— 1965. №13.— С. 147–150.

9. **Krarpup, J.** The simple plant location problem: survey and synthesis [Текст] / J. Krarpup, P. Pruzan // European Journal of Operational Research.— 1983. №12.— P. 36–81.

## REFERENCES

1. **Alekseeva, E.V.** Geneticheskii lokal'nyi poisk dlia zadachi o p-mediane s predpochteniiami klientov [Текст] / E.V. Alekseeva, I.U. Kochetov // Diskretnyi analiz i issledovanie operatsii. Seriya 2.— 2007.— С. 3–31. (rus.)

2. **Ventsiulis, L.S.** Sistemy obrashcheniia s otkhodami: printsipy organizatsii i kriterii [Текст] / L.S. Ventsiulis, Yu.I. Skorik, T.M. Florinskaia.— SPb.: Izd-vo PIIAF RAN, 2007.— 207 s. (rus.)

3. **Kristofides, N.** Teoriia grafov. Algoritmicheskii podkhod [Текст] / N. Kristofides.— M.: Mir, 1978.— 432 s. (rus.)

4. Kartograficheskii resurs: sait Openstreetmap [Elektronnyi resurs].— URL: <http://www.openstreetmap.org>

5. О состоiании okruzhaiushchei sredy v Leningradskoi oblasti [Текст] // Informatsionno-analiticheskii sbornik,

Komitet po prirodnym resursam Leningradskoi oblasti.— SPb. 2010.— 334 s.

6. **Avella, I.** A branch-and-cut algorithm for the median-path problem [Текст] / I. Avella, M. Boccia, A. Sforza, I. Vasil'ev // Computational Optimization and Applications.— 2005. №32.— С. 215–230. (rus.)

7. **Cooper, L.** Location-allocation problems [Text] / L. Cooper // Operations Research.— 1963. №11.— P. 331–343.

8. **Goldman, A.J.** A domination theorem for optimal locations [Text] / A.J. Goldman, P.R. Mayers // Operations Research.— 1965. №13.— С. 147–150.

9. **Krarpup, J.** The simple plant location problem: survey and synthesis [Text] / J. Krarpup, P. Pruzan // European Journal of Operational Research.— 1983. №12.— P. 36–81.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

**КУЛИБАБА Валерий Викторович** — кандидат географических наук заведующий лабораторией геоэкологических проблем природно-хозяйственных систем Федерального государственного учреждения науки «Научно-исследовательский центр экологической безопасности» Российской академии наук; 197110, ул. Корпусная, д.18, г. Санкт-Петербург, Россия

**KULIBABA Valerii V.** — Federal State Institution of Science of the Russian Academy of Sciences (RAS SRCES); 197110, st. Korpusnaya, 18, St.-Petersburg, Russia

**ПЕТУХОВ Валерий Васильевич** — кандидат технических наук старший научный сотрудник лаборатории систем обращения с отходами Федерального государственного учреждения науки Российской академии наук «Научно-исследовательский центр экологической безопасности» РАН; 197110, ул. Корпусная, д.18, г. Санкт-Петербург, Россия

**PETUHOV Valerii V.** — Federal State Institution of Science of the Russian Academy of Sciences (RAS SRCES); 197110, st. Korpusnaya, 18, St.-Petersburg, Russia