

В.В. ПЕТУХОВ, В.В. КУЛИБАБА
**РЕГИОНАЛЬНАЯ
ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
МОНИТОРИНГА ОБОРОТА ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

Петухов В.В., Кулибаба В.В. Региональная информационно-аналитическая система мониторинга оборота твердых бытовых отходов.

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы и перспективы автоматизации мониторинга оборота твердых бытовых отходов (ТБО) в Ленинградской области на базе региональной информационно-аналитической системы: обнаружение и идентификация мест несанкционированного размещения, поддержка принятия решений по размещению новых полигонов ТБО с учетом экологических ограничений, транспортной логистики и сезонной зависимости. Приведены результаты моделирования оптимального размещения сети полигонов по нескольким сценариям, использование данных краудсорсинга по обнаружению несанкционированных свалок.

Ключевые слова: информационная система, принятие решений, мониторинг, логистика, твердые бытовые отходы, система обращения с отходами, моделирование.

Petukhov V.V., Kulibaba V.V. Regional municipal wastes management and monitoring system.

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

Keywords: information system, decision support, monitoring, logistics, municipal wastes, waste management system, modeling.

1. Введение. Эффективность системы мониторинга обращения с отходами зависит от информационной поддержки и уровня автоматизации процесса сбора, анализа и подготовки данных для принятия решений. Мониторинг исполнения полномочий муниципальных органов власти в Ленинградской области по обращению с отходами и учет образования отходов на муниципальном уровне начал проводиться только с 2008 года, и его итоги свидетельствуют о значительном недоучете объемов образования ТБО населением [2,4].

Очевидно, что организация системы экологически безопасного обращения с отходами на уровне региона, минимизация экологического риска воздействия на окружающую среду и население требуют создания современной информационно-аналитической базы, обеспечивающей:

- регулярное обновление и анализ официальных данных по объемам отходов, размещению объектов утилизации, транспортной инфра-

структуре, особо охраняемых природных территориях, нарушенных санитарно-защитных зонах и другие;

- поиск и фильтрацию данных из альтернативных источников о местах самовольного размещения отходов, преобразование данных различных форматов (kml, geojson и т. д.) и регистрация в базе геоданных (по региону, площади, времени обнаружения и т. д.);

- обеспечение достоверности и сопоставимости официальных (Государственный кадастр отходов) и неофициальных данных по обороту муниципальных отходов;

- отображение текущей ситуации по обороту муниципальных отходов на интерактивной Web-карте (по аналогии с сервисами GoogleMaps и Яндекс Карты);

- автоматическое формирование отчетов, содержащих табличные, статистические и картографические материалы;

- рассылка поручений в муниципальные образования по проверке данных, полученных из неофициальных источников и контроль их выполнения в установленные сроки;

- моделирование сценариев обращения с ТБО и эколого-экономических оценок, необходимых для принятия управленческих решений по размещению новых объектов систем обращения с отходами в существующей сети с учетом требований экологической безопасности и транспортной логистики.

2. Структура системы мониторинга. Структура информационной системы мониторинга представлена на рисунке 1.

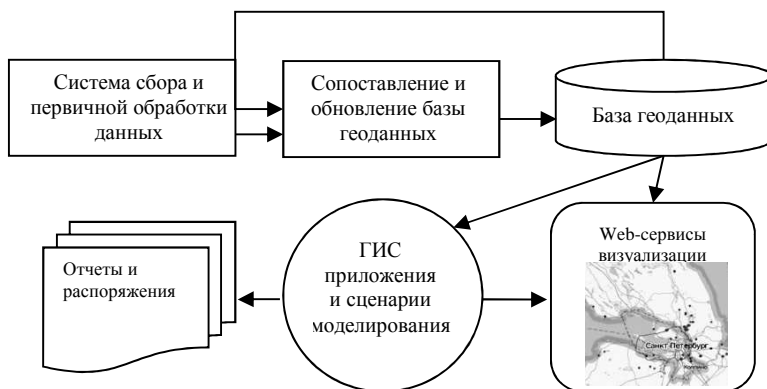


Рис.1. Структура информационно-аналитической системы.

База геоданных содержит информацию об объектах размещения и утилизации отходов (действующих, закрытых, рекультивированных, несанкционированных), самовольных местах размещения ТБО, экологических ограничениях на размещение полигонов и слои общегеографической информации.

Развитие информационно-аналитической системы осуществляется по следующим направлениям:

1. автоматизация процесса обнаружения и идентификации объектов несанкционированного размещения отходов;
2. моделирование оптимального расположения объектов обращения с отходами с учетом экологических и транспортно-логистических ограничений.

Направление 1. Автоматизация процессов сбора и анализа информации для идентификации объектов несанкционированного размещения отходов.

Стихийное размещение отходов в ряде регионов стало одним из основных факторов загрязнения окружающей среды. Выявленное максимальное годовое количество вновь образовавшихся самовольных свалок составило по региону 892 ед. с общим объемом около 191 тыс.м.³ (6% объема ТБО временного и постоянного населения) [4]. Типичные места возникновения свалок: закрытые карьеры, полосы отвода автомобильных дорог, лесные дороги, пустыри у населенных пунктов и т.п.

Обнаружение нелегальных свалок является достаточно сложной задачей, так как распознавание сравнительно небольших объектов на спутниковых снимках крайне затруднительно. Одним из полезных регулярно обновляемых Web-ресурсов по сбору и распространению открытых географических данных, в том числе и по идентификации свалок, является краудсорсинговый проект Openstreetmap [11]. Объем собранных векторных данных превышает 150 Гб и постоянно растет. Ленинградская область является одним из регионов, где активность по выявлению самовольных свалок наиболее высока.

Достоверность этих данных невысока, поэтому при обнаружении новых объектов формируется поручение в соответствующее муниципальное образование для проверки этих сведений.

Направление 2. Моделирование сети объектов обращения с отходами.

Сложность моделирования обусловлена неравномерной пространственной плотностью образования отходов, разной степенью развито-

сти дорожной сети, неравномерным распределением санкционированных мест размещения отходов, разбросом тарифов на вывоз отходов (от 80 до 550 рублей за м³; 26% поселений находятся вне зоны нормативной транспортной доступности), сезонным изменением объема образования отходов (рис.2).

Перечисленные факторы осложняют формирование экономически эффективных транспортно-логистических схем сбора и вывоза отходов.

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 экономическую эффективность региональной системы обращения с отходами.

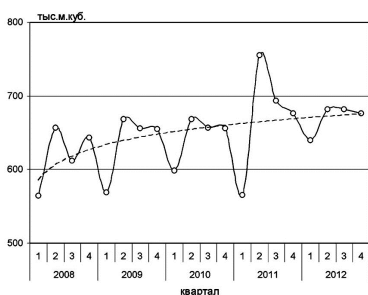


Рис. 2. Динамика образования ТБО в регионе.

Существует ряд различных моделей оптимизации расположения подобных объектов:

- модель, основанная на проблеме Штейнера [9], заключается в следующем: на плоскости необходимо соединить множество точек P линиями так, чтобы сумма длин полученных отрезков была минимальна;

- простейшая задача размещения (заключается в том, чтобы найти такое подмножество пунктов

обслуживания (полигоны ТКО, мусоросжигательные и мусороперерабатывающие заводы), при котором достигается минимум суммарных затрат на обслуживание n -клиентов (пунктов сбора отходов); недостаток - необходимо иметь подробные данные о пространственном распределении социально-экономических, географических и других факторов в модельном регионе: получение подобной информации для большинства регионов крайне затруднительно, поэтому вариант Штейнера рассматривается как более предпочтительный;

- модель p -медиан - одна из классических моделей оптимизации размещения предприятий с учетом дорожной сети.

Задача о p -медиане возникает во многих приложениях, например, размещение предприятий бытового обслуживания, складов, пунктов автосервиса на дорогах, коммутаторов в телефонной сети и др. [1,

3,6,10]. Она отличается от простейшей задачи размещения двумя аспектами: в ней не учитываются стоимости на открытие (создание) предприятий и есть ограничение на число предприятий, которые могут быть открыты (рис.3).

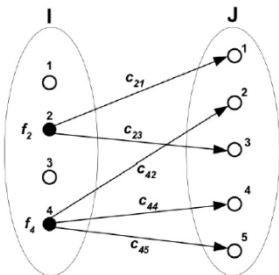


Рис. 3. Оптимизация сети объектов размещения отходов

Задача нахождения p -медианы в приложении к проблеме оптимального размещения объектов утилизации отходов является наиболее удобной и конструктивной среди рассмотренных моделей: данная модель позволяет учесть как структуру дорожной сети региона, так и дифференциацию населенных пунктов по объемам производства отходов. Также существует возможность наложить ограничение 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.

Задача о нахождении p -медианы графа G — это задача о размещении заданного числа (скажем, p) пунктов обслуживания (рис.4), при которых сумма кратчайших расстояний от вершин графа до ближайших пунктов принимает минимально возможное значение.

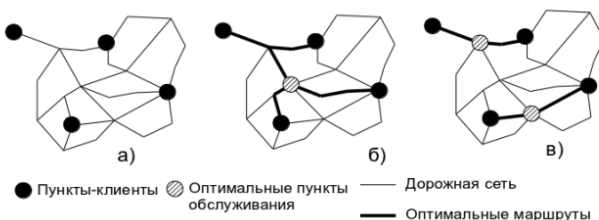


Рис 4. Задача размещения p -медиан на дорожном графе.

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

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

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

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

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

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

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

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

Внешне-внутренней медианой графа называется вершина \bar{x}_o , для которой

$$s_i(\bar{x}_{oi}) = \min_{x_i \in X} [s_o(x_i) + s_i(x_i)]. \quad (5)$$

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, а во множестве точек внешне-внутренней p -медианы (5) — суммарное расстояние от «производителей» с возвращением обратно.

Таким образом, p -медиана графа является оптимальным по суммарному расстоянию множеством точек сети объектов размещения отходов.

На практике требуется определить оптимальное расположение не только на вершинах графа, но и на всей дорожной сети. Однако не существует такой точки на дуге графа, которое было бы лучшим приближением к p -медиане, чем смежная этой дуге вершина [7].

Если за вес вершин графа принять объем образования отходов в этом пункте, а за вес дуг — фактическое расстояние по дорожной сети между инцидентными ей вершинами, то данное 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 p -медиан на дорожном графе, 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.

3. Реализация модели. На основе обновляемых данных о дорожной сети Ленинградской области [11] формируется дорожный граф, на котором осуществляется оптимизация расположения объектов размещения отходов (рис.5).



Рис. 5. Преобразование географических данных дорожной сети в граф.

Задача состоит в следующем: пусть задано множество возможных пунктов размещения предприятий, множество клиентов, также пусть заданы величины, задающие транспортные затраты на обслуживание конкретного клиента из конкретного пункта. Задача о p -медиане заключается в выборе p пунктов размещения

предприятий так, чтобы суммарные затраты на обслуживание всех клиентов были минимальны. Несмотря на кажущуюся простоту постановки, задача о p -медиане является NP-трудной, что существенно сказывается на скорости ее решения с увеличением размерности.

Пусть, дан граф G , который моделирует дорожную сеть региона. Под вершинами X подразумевается множество перекрестков дорожной сети. Известны географические координаты каждого перекрестка l_i . Дуга графа (x_i, x_j) , где $x_i, x_j \in X$, существует тогда и только тогда, когда существует прямая (не проходящая через другие перекрестки) дорога из x_i в x_j по дорожной сети. Аналогично с вершинами, для дуг известны географические координаты маршрута из x_i в x_j по дорожной сети. Каждой дуге графа соответствует неотрицательное число c_{ij} , которое определяет фактическое расстояние по дорожной сети от x_i до x_j . Это расстояние можно задавать явно или вычислять по географическим координатам дуги графа (x_i, x_j) .

Под множеством T будем понимать совокупность населенных пунктов региона. Каждому $t_n \in T$ сопоставлено неотрицательное число V_i , соответствующее объему производства твердых бытовых отходов в данном населенном пункте. Также известны географические координаты l_n административной границы населенных пунктов, представленные совокупностью многоугольников. Пересечение сети,

построенной по географическим координатам элементов графа G с административной границей населенного пункта даёт множество точек на графе X_n . За расстояние $d(X_n, x_i)$ между населенным пунктом и вершиной графа x_i примем:

$$\min_{x_i \in X_n} [d(x_i', x_i)]. \quad (6)$$

Под множеством P будем понимать совокупность существующих объектов размещения отходов в регионе. Для каждого $p_i \in P$ определены географические координаты l_k местоположения объекта. Обозначим за x_k точку падения нормали минимальной длины местоположения l_k к сети, построенной по географическим координатам элементов графа G . За расстояние $d(p_i, x_i)$ между объектом размещения отходов p_i и вершиной графа x_i примем расстояние между x_k и x_i .

Сценарии моделирования:

- определение места постройки нового объекта,
- создание новой сети размещения объектов обращения с отходами и сопоставление результатов с существующей сетью (в пределах одного района, в 2-3 смежных районах),
- пересчет логистики при изменении количества проектируемых полигонов,
- расчет схемы маршрутов при ликвидации незаконных свалок,
- двухэтапная схема вывоза отходов.

Определение места организации нового объекта

Допустим, принимается решение о строительстве нового объекта размещения отходов в уже существующей сети. Требуется найти оптимальное расположение нового объекта так, чтобы возможный грузооборот был минимален.

Пусть P - множество существующих объектов размещения отходов в регионе. Требуется найти на графе G вершину x_p такую что:

$$s_o(\bar{X}_p) = \min_{x_i \in (P \cup x_p)} [s_o(X_p)]. \quad (7)$$

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

Моделирование сети новых объектов размещения

Предположим, в регионе необходимо построить n новых объектов

размещения отходов. Наличие в регионе уже функционирующих объектов не учитывается, это будет принято во внимание после проведения моделирования, чтобы продлить срок их действия, если новый объект окажется по соседству с существующим. Множество оптимальных мест размещения объектов утилизации будет:

$$s_o(\bar{X}_p) = \min_{X_p \in X} [s_o(X_p)]. \quad (8)$$

Результаты моделирования представлены на рисунке 7.



Рис.7. Сравнение модельной (слева) и существующей (справа) сетей размещения полигонов ТБО

Заключение. Развитие информационно-аналитической поддержки для автоматизации решения 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 качественно улучшит мониторинг оборота ТБО.

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

Литература

1. *Е.В.Алексеева, Ю.А.Кочетов*, “Генетический локальный поиск для задачи о медиане с предпочтениями клиентов”, Дискретный анализ и исследование операций, сер. 2 (2007), 3-31.
2. *Л.С.Венцюлис, Ю.И.Скорик, Т.М. Флоринская*, Системы обращения с отходами: принципы организации и критерии, СПб: ПИЯФ РАН, 2007, 207 с.
3. *Н.Кристофидес*, Теория графов. Алгоритмический подход, М.:Мир, 1978, 432 с.

4. О состоянии окружающей среды в Ленинградской области, Информационно-аналитический сборник, Комитет по природным ресурсам Ленинградской области. СПб: 2010, 334 с.
5. *I.Avella, M.Boccia, A.Sforza, I.Vasil'ev*, A branch-and-cut algorithm for the median-path problem, *Computational Optimization and Applications*, 32 (2005), 215-230.
6. *L.Cooper*, Location-allocation problems, *Operations Research*, 11 (1963), 331-343.
7. *A.J.Goldman, P.R.Mayers*. A domination theorem for optimal locations, *Operations Research*, 13 (1965), 147-150.
8. *J. Krarup, P. Pruzan*. The simple plant location problem: survey and synthesis. *European Journal of Operational Research*, v12 (1983), 36-81.
9. *J.Levy*. An extended theorem for location on a network, *Operations Research Quarterly*, 18 (4), 1967, 433-442.
10. *Z.A.Melzak*. On the problem of Steiner, *Canadian Mathematical Bulletin*, v4 (1961), 143-148.
11. Картографический ресурс: сайт Openstreetmap, [электронный ресурс] URL: <http://www.openstreetmap.org>,

Кулибаба Валерий Викторович — кандидат географических наук; заведующий лабораторией геоэкологических проблем природно-хозяйственных систем Федерального государственного учреждения науки Российской академии наук (НИЦЭБ РАН). Область научных интересов: региональное природопользование, экологическая безопасность. Число научных публикаций — 38. kouval@rambler.ru, www.ecosafety-spb.ru; ул. Корпусная, 18, Санкт-Петербург, 197110, РФ; +7(812) 499-64-54 факс: +7(812)499-64-74.

Kulibaba Valery Viktorovich — PhD, head of the laboratory of geoeological problems of natural-industrial systems, Research center for ecological safety (SRCES RAS). Research area: regional natural resources usage, environmental safety. The number of publications— 38.kouval@rambler.ru, www.ecosafety-spb.ru; St. Petersburg, 197110, Russia; office phone +7(812)499-64-54, fax+7(812)499-64-74.

Петухов Валерий Васильевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории систем обращения с отходами Федерального государственного учреждения науки Российской академии наук (НИЦЭБ РАН). Область научных интересов: геоинформационные технологии, обработка данных, системы принятия решений, моделирование. Число научных публикаций — 26. vvpetukhov@yandex.ru, www.ecosafety-spb.ru; ул. Корпусная, 18, Санкт-Петербург, 197110, РФ; +7(812) 499-64-54 факс: +7(812)499-64-74.

Petukhov Valery Vasilievich — PhD, senior researcher of the laboratory of waste management systems, Research center for ecological safety (SRCES RAS). Research area: geographic information systems applications, data processing, decision support and modeling. The number of publications— 26. vvpetukhov@yandex.ru, www.ecosafety-spb.ru; St. Petersburg, 197110, Russia; office phone +7(812)499-64-54, fax+7(812)499-64-74.

Рекомендовано лабораторией информационно-вычислительных систем, заведующий лабораторией Воробьев В.И., д-р техн. наук, проф.; заведующий кафедрой информатики РГПУ им.А.И.Герцена Копыльцов А.В., д-р техн. наук; профессор кафедры прикладной математики и информатики СПбГАСУ Вагер Б.Г., д-р физ.-мат. наук.

Статья поступила в редакцию 07.02.2013

РЕФЕРАТ

Петухов В.В., Кулибаба В.В. **Региональная информационно-аналитическая система мониторинга оборота твердых бытовых отходов.**

В статье рассмотрены проблемы и перспективы автоматизации мониторинга оборота твердых бытовых отходов (ТБО) в Ленинградской области на базе региональной информационно-аналитической системы: обнаружение и идентификация мест несанкционированного размещения, поддержка принятия решений по размещению новых полигонов ТБО с учетом экологических ограничений, транспортной логистики и сезонной зависимости.

Проанализированы три подхода к решению задачи определения оптимальной территориальной сети объектов размещения отходов и моделирования транспортных потоков с учетом использования регулярно обновляемых открытых геоданных проекта OpenstreetMap (OSM) по дорожной сети Ленинградской области и местам самовольного размещения отходов. Моделируются такие ситуации как выбор места размещения нового полигона, планирование сети станций сортировки/перегрузки, задача коммивояжера для крупных населенных пунктов, оценка экономического эффекта от выбора альтернативного места размещения полигона. Обоснована достаточность модифицированного метода *p*-медиан для моделирования вышеперечисленных ситуаций.

Разработаны программные модули, обеспечивающие регулярную загрузку данных OSM (дорожная сеть и несанкционированные места размещения) в базу геоданных, сопоставление обновленных данных с накопленной информацией, преобразование данных дорожной сети в граф связный с размещением населенных пунктов; ГИС-приложения по формированию ограничений на размещение новых объектов.

Приведены результаты моделирования оптимального размещения сети полигонов по нескольким сценариям, использование данных краудсорсинга по обнаружению несанкционированных свалок.

Результаты моделирования подтверждаются практикой и опытом организации систем обращения с отходами.

SUMMARY

Petukhov V.V., Kulibaba V.V. **Regional municipal wastes management and monitoring system.**

The paper deals with current status and perspectives of municipal wastes management and monitoring system for Leningrad oblast. Considered several approaches to the allocation problem for regional network of landfills (for Leningrad oblast) taking into account already existing objects, traffic flows, cost of transportation, environmental demands.

Decision support is aimed at: best place for allocation of newly planned landfill, simulate network structure of sorting/compaction stations, estimation of economic effect from choosing alternative landfill allocation.

Information support is based on developed applications for Openstreetmap data loading and conversion, GIS implementation, web-services (similar to Google Maps/Yandex Maps). Gained results approve usage of modified p -median method for optimal allocation of landfills for existing road network, specific features of the territory, settlements and ecological restrictions.

Used data sources: official data from State registry of landfills, GIS layers (water bodies, protected territories, wetlands and marshlands, ecological standards and restrictions), Openstreetmap project data (road network and waste dumps).