

УДК 004.942
DOI: 10.15827/0236-235X.129.076-083

Дата подачи статьи: 22.07.19
2020. Т. 33. № 1. С. 076–083

Алгоритм комплексирования маршрутов для разработки электронной модели территориальной схемы обращения с отходами

О.И. Христодуло¹, д.т.н., профессор, o-hristodulo@mail.ru

А.Х. Абдуллин¹, к.т.н., доцент, kaf-gis@ugatu.su

Г.Ф. Багаманишина¹, студент, kaf-gis@ugatu.su

¹Уфимский государственный авиационный университет, г. Уфа, 450000, Россия

Реформа сферы обращения с отходами затрагивает множество аспектов, и вопросы рациональной организации транспортирования отходов актуальны для всех регионов России. Одним из направлений совершенствования территориальных схем является снижение затрат на доставку отходов до полигонов или мест утилизации, а также тарифов для населения. Для совершенствования заложенной в основу схемы модели требуется проведение анализа и распределения потоков отходов с учетом динамики образования отходов, пространственных особенностей муниципальных территорий, определения темпа накопления отходов на полигонах. Решается задача комплексирования маршрутов перевозки отходов для совершенствования электронной модели территориальной схемы обращения с ними.

В статье рассматривается ряд наиболее известных моделей и подходов к распределению материальных потоков в пространственно-распределенных системах, оценена их применимость для модификации схем. Выяснено, что ни один из таких подходов нельзя напрямую применить к сфере обращения с отходами. Известные алгоритмы транспортной логистики не способны учесть совокупность факторов, характерных для сформировавшейся в регионе модели транспортирования отходов, требуются их сочетание и доработка. Формализуется описание организации сбора, утилизации и захоронения отходов, а также распределения потоков твердых коммунальных отходов от локальных центров до полигонов.

Представлен алгоритм комплексирования маршрутов перевозки отходов. Авторами на основе предложенного алгоритма разработан пакет скриптов, с помощью которых проведены анализ и моделирование потоков транспортирования отходов.

Результаты комплексирования маршрутов позволяют разработать целостную и непротиворечивую электронную модель территориальной схемы обращения с отходами.

Ключевые слова: управление отходами, распределение потоков отходов, транспортировка отходов, пространственный анализ, ArcGIS.

Организация сбора *твердых коммунальных отходов* (ТКО) актуальна для всех регионов России. С 2014 года в субъектах РФ разрабатываются *территориальные схемы обращения с отходами* (ТСО) в виде электронных моделей с картографическим содержанием (цифровыми картами, схемами, планами). Электронные модели предназначены для информационной поддержки мер, направленных на снижение вреда окружающей среде, на создание ресурсосберегающих и безотходных технологий производства, а также эффективной и рациональной системы обращения с отходами. В конечном итоге ТСО призвана обеспечить механизмы экономически жизнеспособной модели обращения с отходами на региональном уровне.

В основе электронной модели лежит принцип баланса: образованные отходы и отходы прошлых периодов должны быть утилизированы/переработаны и размещены на объектах

захоронения или долговременного хранения (полигонах ТКО). Основным способом сбора и удаления ТКО в настоящее время является организация локальных центров первичного сбора отходов (контейнеры, контейнерные площадки, бестарный сбор) и дальнейшее транспортирование на свалки, полигоны отходов, на утилизацию и переработку. Географический (пространственный) аспект модели заключается в том, что множество пунктов образования отходов транспортно связано с объектами перевалки и сортировки отходов (*мусороперегрузочными комплексами (станциями – МПС)* и полигонами ТКО). Существенная доля затрат связана с транспортными издержками в процессах сбора отходов, их доставки до МПС и полигонов ТКО.

Сравнительно простой способ повышения эффективности ТСО – оптимизация схемы распределения потоков ТКО. Далее в статье пока-

зан подход авторов к усовершенствованию ТСО на примере Республики Башкортостан.

В настоящее время, как показывает практика, распределение потоков отходов не всегда оптимально с точки зрения удовлетворения потребностей субъектов обращения с отходами (управляющих организаций многоквартирных домов, организаций по сбору и транспортировке отходов). Это приводит к тому, что действующая ТСО не в полной мере учитывает особенности развития муниципальных территорий, динамику образования отходов и пр. Для совершенствования заложенной в основу ТСО модели требуется анализ распределения потоков ТКО с учетом динамики образования отходов, особенностей муниципальных территорий, темпа накопления отходов на полигонах [1, 2].

Рассмотрим для примера ТСО Республики Башкортостан (рис. 1). С целью снижения затрат на вывоз и захоронение ТКО территория республики разделена на 4 административно-производственные зоны с объектами размещения отходов, а также зону деятельности по обслуживанию закрытого административно-территориального образования Межгорье. Каждая территориальная зона соответствует зоне деятельности регионального оператора. Расчет затрат (тарифа) региональных операторов по обращению с ТКО производится на основании объемов образования и распределения ТКО на обработку, утилизацию, обезвреживание и захоронение отходов. Для формирования сбалансированных тарифов необходимо «выровнять» транспортные затраты на сбор и вывоз отходов.

Можно заметить, что в схеме рассматриваются центры городских округов и муниципальных районов. Особенностью системы проживания населения республики является преобладание малых городов, поселков, сел и деревень. В ходе более детального изучения схемы на уровне сельских поселений и части городских округов картина меняется. При изучении сформированных маршрутов перевозки отходов выявляется ряд специфических проблем. Так, можно увидеть, что при транспортировании отходов с мест их первичного образования имеются участки, на которых маршруты пересекаются. Это приводит к избыточности в электронной модели ТСО, а также к недостоверности информации об объеме транспортируемых отходов.

Еще одной явно выраженной проблемой является приоритет в транспортировании отходов между локальными пунктами образования

отходов и полигонами ТКО. На схеме наблюдаются ситуации, когда транспортирование отходов происходит в пределах муниципального района, в котором расположен населенный пункт. Нередко расстояние до полигона ТКО в соседнем муниципальном районе значительно меньше, а значит, использовать этот полигон отходов экономически целесообразнее. Эти обстоятельства приводят к необходимости пересмотра модели распределения потоков отходов и дальнейшей корректировки действующей модели ТСО.

Общей чертой известных подходов и моделей, применимых для анализа и моделирования распределения материальных потоков, является описание возникновения и переноса материальных потоков (в данном случае коммунальных отходов) из множества пространственно-распределенных точек (как правило, это населенные пункты или внутригородские территории) в несколько локальных центров.

Транспортно-логистический подход основан на моделировании транспортных сетей с помощью математических моделей планирования сети. Моделирование загрузки транспортной сети является многокомпонентной задачей, требующей для поиска решения построения различных типов математических моделей.

В работе [3] описана классическая схема моделирования транспортных потоков в сетях крупного города. Она включает в себя четыре основных этапа.

1. Оценка общих объемов прибытия и отправления из района города.
2. Расщепление по способам передвижения: общественным транспортом, пешком, на личном автомобиле и т.д.
3. Выбор матриц корреспонденции, определяющих объем передвижений между каждой парой расчетных районов города.
4. Распределение корреспонденции по транспортной сети, то есть определение всех путей, выбираемых участниками движения, и количества передвижений по каждому пути.

Разделение на этапы при моделировании транспортной сети является условным, так как все они взаимосвязаны и не могут существовать друг без друга.

Для описания распределения потокообразующих объектов территория делится на некоторое количество участков «район–отправление». Каждый такой район включается в транспортный граф как узел, соединенный с другими узлами. Общий объем передвижений из одного участка в другой называется межрайонной кор-

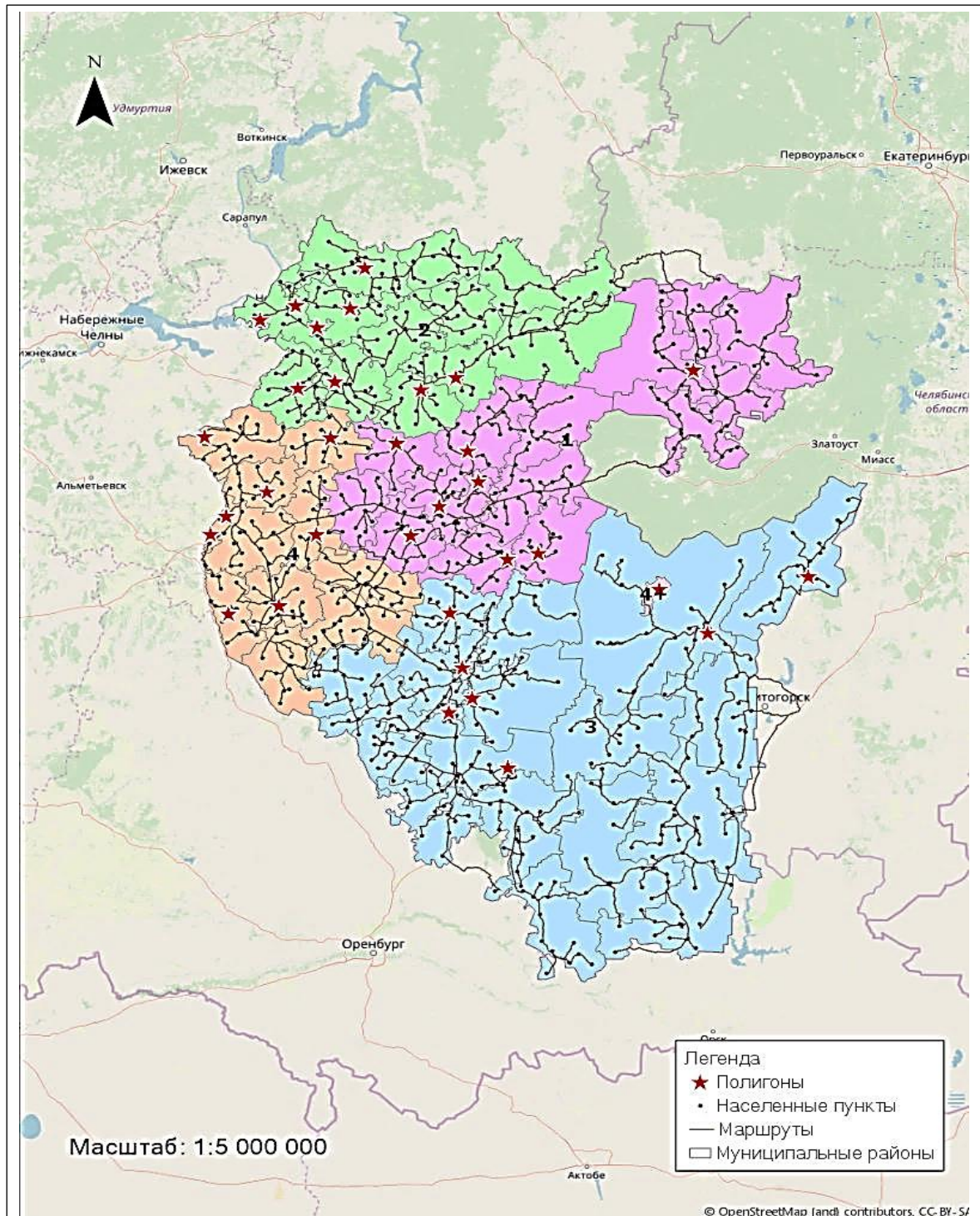


Рис. 1. Электронная модель ТСО в Республике Башкортостан

Fig. 1. Electronic model of the territorial scheme of waste management in the Republic of Bashkortostan

респондентией. На основе этих данных строится матрица корреспонденции, которая используется для принятия решений в различных моделях. К числу наиболее распространенных моделей расчета матрицы корреспонденций от-

носятся гравитационные и энтропийные модели.

Идея гравитационной модели [4, 5] основана на определении привлекательности объекта, которая прямо пропорциональна размеру

объекта и обратно пропорциональна расстоянию между пользователем и объектом. Однако следует учитывать то, что в распределении потоков отходов привлекательность объекта (полигона ТКО) играет не самую важную роль.

В отличие от гравитационной модели концепция энтропийной модели [6] заключается в вероятностном описании поведения пользователей транспортной сети, которые случайным образом распределяются по некоторому набору возможных состояний. Но в процессе сбора и транспортирования отходов пользователь сети (водитель транспорта) следует по маршруту, который предварительно смоделирован с учетом всех требований и ограничений.

Дальнейшее распределение потоков происходит определением загрузки сети с применением различных моделей на основе матрицы корреспонденции. Существующие модели загрузки транспортной сети могут быть разбиты по используемому подходу на нормативные и дескриптивные, по фактору времени на статические и динамические [7]. Основной причиной невозможности использования этих моде-

лей является то, что обращение с отходами налагает свои ограничения и требования на распределение материальных потоков.

В мировой практике широкое распространение для решения транспортно-логистических проблем получили специализированные *геоинформационные системы* (ГИС). Функционирование данных систем основано на использовании геоинформационных методов и алгоритмов. Так, для решения логистических задач эффективны методы и алгоритмы сетевого анализа [8].

Далее авторы статьи используют линейку программных продуктов ArcGIS [9]. Однако в ArcGIS нет встроенных инструментов для создания карты распределения потоков, поэтому появляется необходимость разработки алгоритмов и инструментов комплексирования маршрутов распределения потоков отходов.

Обозначим элементы ТСО в терминах иерархических структур (рис. 2). Корнем дерева является субъект РФ – R . Территория субъекта разделена на зоны деятельности региональных операторов – Z_i . На территории субъек-

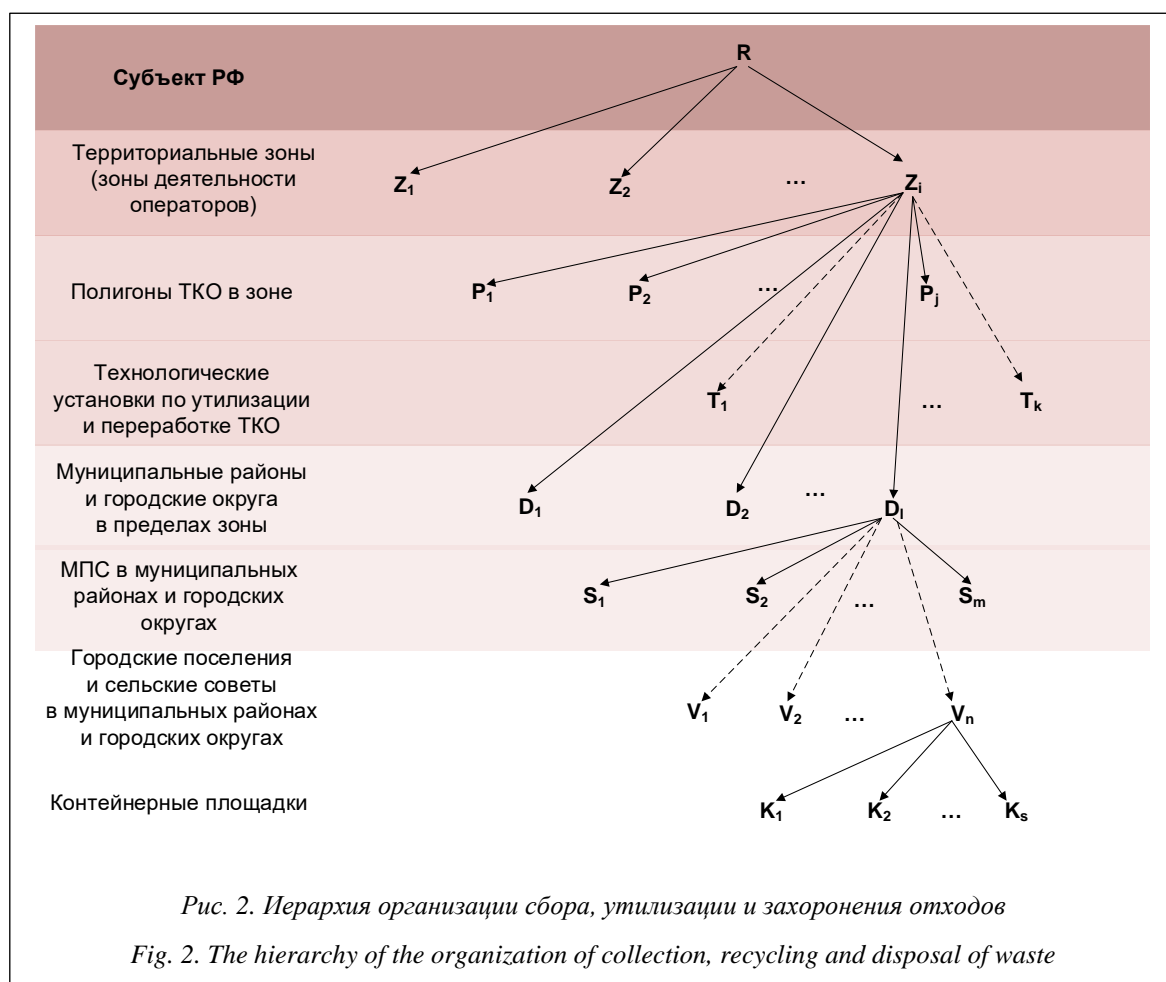
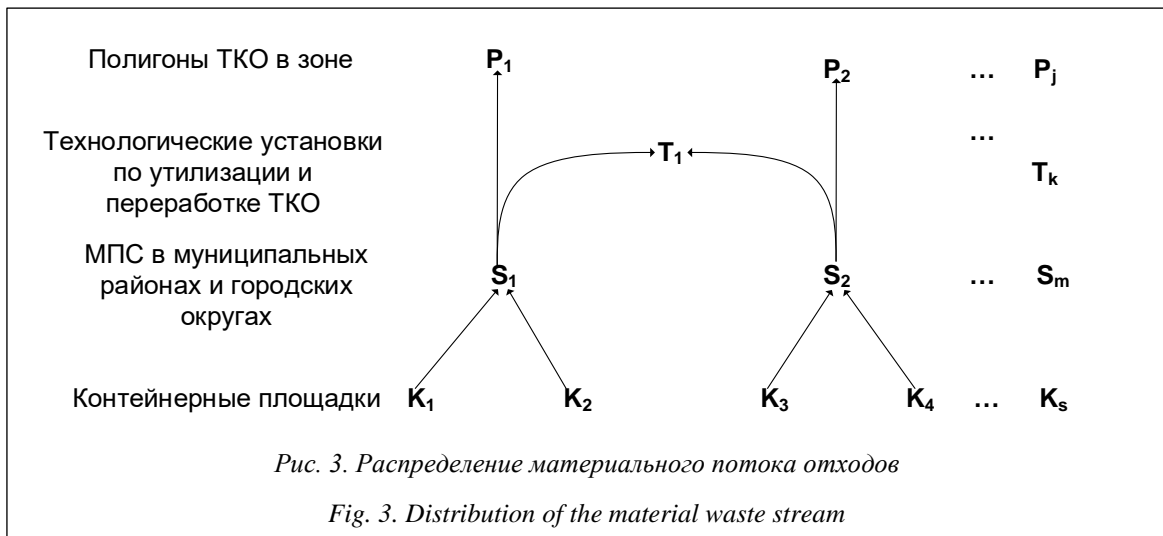


Рис. 2. Иерархия организации сбора, утилизации и захоронения отходов

Fig. 2. The hierarchy of the organization of collection, recycling and disposal of waste

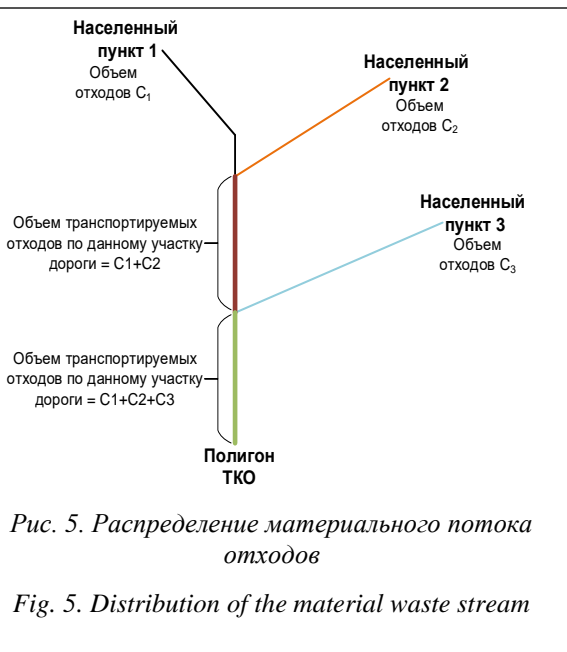
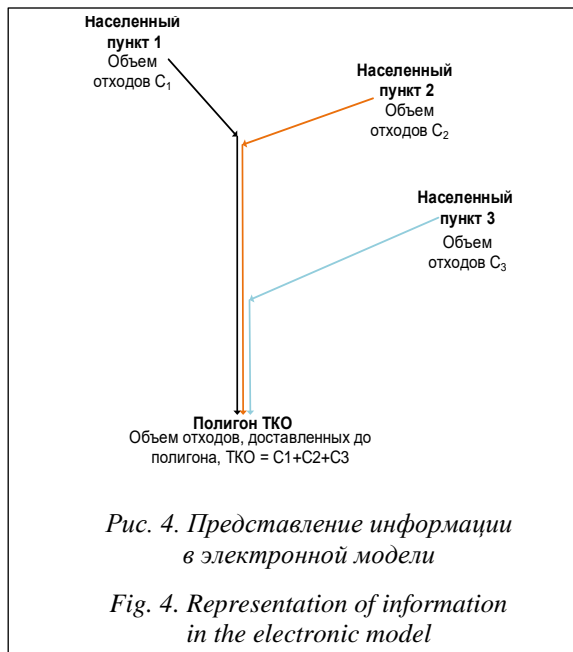


екта РФ находятся полигоны ТКО (P_i) и технологические установки по утилизации и переработке ТКО (T_k). Так как у каждого регионального оператора своя зона ответственности, полигоны ТКО и технологические установки «закреплены» за одной зоной. Также каждый муниципальный район, городские округа (D_i) и МПС (S_m) распределены между территориальными зонами. Городские поселения и сельские советы в муниципальных районах и городских округах (V_n) и контейнерные площадки (K_s) являются локальными центрами первичного сбора отходов.

Маршрут мусоровоза (рис. 3) составляет путь от мест первичного сбора отходов K_i до перегрузки в МПС S_m , далее до места складирования P_j или переработки T_k .

Как уже было отмечено, маршруты в электронной модели пересекаются, что приводит к недостоверности получаемой информации. На рисунке 4 приведен пример используемых маршрутов перевозки отходов. На данный момент информация об объемах транспортируемых отходов имеется лишь на начальной и конечной точках маршрута. Между тем для полноценного формирования информации необходимы данные об объемах транспортируемых отходов через определенные участки маршрута (рис. 5).

Проведя анализ электронной модели ТСО, описав процесс сбора, утилизации и захоронения отходов, определим исходные данные, используемые для решения задачи. Как можно заметить, необходимы сведения о полигонах



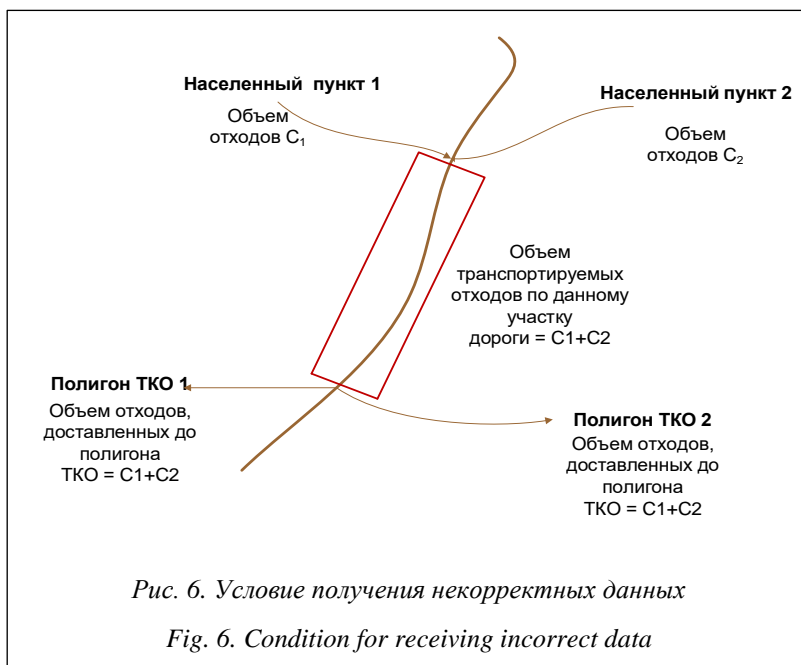
ТКО, подробная характеристика обслуживаемого района (муниципальное образование, населенные пункты и т.д.), сведения о количестве городского и сельского населения, нормативах образования отходов на одного городского и сельского жителя, сформированных маршрутах.

На основе анализа исходных данных разработан алгоритм комплексирования маршрутов перевозки материальных потоков. Комплексирование маршрутов происходит следующим образом:

- выбираем полигон ТКО, все маршруты между ним и локальными центрами образования отходов;
- анализируем маршруты на пересекающиеся участки;
- если маршруты пересекаются, делим их на сегменты;
- общие участки дорог объединяем и добавляем информацию об объеме перевозимых отходов на данном сегменте;
- корректируем схему потоков ТКО от источников их образования до объектов, используемых для обработки, утилизации, обезвреживания, размещения отходов.

Следует отметить, что существенным недостатком представленного выше алгоритма является получение некорректных данных в случае, когда один участок дороги является общим для транспортирования отходов от населенных пунктов до нескольких полигонов ТКО. В данной ситуации баланс объема образования отходов будет нарушен (рис. 6).

Авторами разработан пакет скриптов на языке высокого уровня Python, реализующий предложенный алгоритм, с использованием библиотеки ArcPy для ArcGIS Desktop [10]. Проведенное моделирование потоков транспортирования отходов в Республике Башкортостан



стан на основе предложенного алгоритма комплексирования маршрутов позволило выделить более 2 000 повторяющихся участков. Удаление таких участков (в терминах ГИС – преобразование в топологически корректные фрагменты маршрутов) позволяет разработать целостную и непротиворечивую электронную модель ТСО.

Заключение

Результаты, полученные при комплексировании маршрутов перевозки материальных потоков, полезны для корректировки схемы потоков ТКО от источников их образования до объектов, используемых для обработки, утилизации, обезвреживания, размещения отходов; оценки существующего положения в области обращения с отходами на территории РБ; определения оптимальных логистических маршрутов транспортирования ТКО от источников образования до объектов по обработке, утилизации, размещению; осуществления деятельности по повышению достоверности и доступности информации в области обращения с отходами.

Результаты исследований, представленные в статье, частично поддержаны грантом РФФИ № 18-08-00885-А.

Литература

1. Зайтов И.Н., Абдуллин А.Х., Христодуло О.И., Маслов Д.А. Интеграция информационных систем по формированию и ведению Регионального кадастра отходов и «Инспекционная деятельность»

для Минэкологии РБ // Геоинформ. технологии в проектировании и создании корпоратив. информ. систем. 2010. С. 87–92.

2. Bagamanshina G.F., Abdullin A.Kh., Sabirova L.D. Spatial analysis for waste territorial scheme optimizing // Вестн. современ. исследований. 2018. № 8–1. С. 238–242 (англ.).

3. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. № 11. С. 3–46.

4. Huff D.L. Parameter estimation in the huff model. 2003, pp. 34–36. URL: <https://www.esri.com/news/arcuser/1003/files/huff.pdf> (дата обращения: 20.07.2019).

5. Reilly W.J. The law of retail gravitation. NY, Knickerbocker Press, 1931, 75 p.

6. Wilson A.G. Entropy in urban and regional modelling. London, Pion Publ., 1970, 166 p.

7. Швецов В.Л., Прохоров А.В., Морозов В.П., Кузнецов А.В. Динамическая транспортная модель – новые возможности управления городской мобильностью в режиме реального времени // Мир дорог. 2018. № 110. С. 30–32.

8. Network Analyst. URL: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/guide-books/extensions/network-analyst/what-is-network-analyst-.htm> (дата обращения: 20.07.2019).

9. Esri/Products. URL: <https://www.esri-cis.ru/products/> (дата обращения: 20.07.2019).

10. Python в ArcGIS Pro. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/arcpy/get-started/installing-python-for-arcgis-pro.htm> (дата обращения: 20.07.2019).

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.129.076-083

Received 22.07.19
2020, vol. 33, no. 1, pp. 076–083

Algorithm of route integration for the development of an electronic model of a territorial waste management scheme

*O.I. Khristodulo*¹, Dr.Sc. (Engineering), Professor, o-hristodulo@mail.ru
*A.Kh. Abdullin*¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, kaf-gis@ugatu.su
*G.F. Bagamanshina*¹, Student, kaf-gis@ugatu.su

¹ Ufa State Aviation Technological University, Ufa, 450000, Russian Federation

Abstract. The reform of the waste products distribution touches many aspects. The questions of the rational organization of the waste transportation are actual for the all-Russian regions. The one of the directions of the development territorial arrangement is a reduction in expenses for fuel waste delivery to the waste polygons or the places of their utilization, a tariff cut for the citizens. For developed the underlying territorial scheme of a waste management we need the carrying-out of an analysis and the waste direction control with consideration to the waste formation dynamics, the spatial features of the municipal territories, accumulation rate determination of the waste on the polygons. Specialists solve the problem of the road complexation of the refuse transport for the electronic model development of the waste management scheme. The paper has a look at the number of the most identified models and ways to the material allocation in the spatially-regular system. There is an estimate of its using for modifying of the territorial scheme of a waste management. The specialists recognized that one of such approaches must not directly use to the waste management. The using the well-known algorithms of the transport logistic disabled to take stock of the combination of the factors, representative for a mature model in a transportation of waste region. There needs their combination and refinement. There is a collection organization description, utilization and waste disposal, and a direction control of a municipal solid waste from the local centers to the polygons.

The authors showed the algorithm of the complexation cargo transportation route. There is a script package based on the offered algorithm, with help of this the specialists made the analysis of the modeling waste transport flows. The complexation results of the march allow developing the whole and consistent electronic model of the territorial waste management scheme.

Keywords: waste management, waste flow distribution, waste transportation, spatial analysis, ArcGIS.

Acknowledgements. The research results from the paper have been partly supported by RFBR no. 18-08-00885-A.

References

1. Zaitov I.N., Abdullin A.Kh., Khristodulo O.I., Maslov D.A. Integration of information systems on forming and managing the Regional waste inventory and “Inspection Activities” for the Ministry of Ecology of the Republic of Bashkortostan. *Geoinform. Technologies in Designing and Creation of Corporate Inform. Syst.* 2010, pp. 87–92 (in Russ.).
2. Bagamanshina G.F., Abdullin A.Kh., Sabirova L.D. Spatial analysis for waste territorial scheme optimizing. *Vestn. Sovremen. Issledovany.* 2018, no. 8–1, pp. 238–242 (in Engl.).
3. Shvetsov V.I. Mathematical modeling of traffic flows. *Avtomatika i Telemekhanika.* 2003, 11, pp. 3–46 (in Russ.).
4. Huff D.L. *Parameter Estimation in the Huff Model.* 2003, pp. 34–36. Available at: <https://www.esri.com/news/arcuser/1003/files/huff.pdf> (accessed July 20, 2019).
5. Reilly W.J. *The Law of Retail Gravitation.* NY, Knickerbocker Press, 1931, 75 p.
6. Wilson A.G. *Entropy in Urban and Regional Modelling.* London, Pion Publ., 1970, 166 p.
7. Shvetsov V.L., Prokhorov A.V., Morozov V.P., Kuznetsov A.V. Dynamic transport model. New opportunities for urban real-time mobility management. *World of Roads.* 2018, no. 110, pp. 30–32 (in Russ.).
8. *Network Analyst.* Available at: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/guide-books/extensions/network-analyst/what-is-network-analyst-.htm> (accessed July 20, 2019).
9. *Esri/Products.* Available at: <https://www.esri-cis.ru/products/> (accessed July 20, 2019).
10. *Python в ArcGIS Pro.* Available at: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/arcpy/get-started/installing-python-for-arcgis-pro.htm> (accessed July 20, 2019).

Для цитирования

Христодуло О.И., Абдуллин А.Х., Багаманшина Г.Ф. Алгоритм комплексирования маршрутов для разработки электронной модели территориальной схемы обращения с отходами // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33. № 1. С. 076–083. DOI: 10.15827/0236-235X.129.076-083.

For citation

Khristodulo O.I., Abdullin A.Kh., Bagamanshina G.F. Algorithm of route integration for the development of an electronic model of a territorial waste management scheme. *Software & Systems.* 2020, vol. 33, no. 1, pp. 076–083 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.129.076-083.