

# Формальная процедура анализа свойств системы обращения с твердыми коммунальными отходами на основе положений эвергетики, аппарата теории надежности и ГИС-технологий

Гвоздев В.Е., Христовуло О.И.

**Аннотация** — В настоящее время проблема организации системы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) стоит наиболее остро, как и в большинстве российских регионов, так и во всем мире. Различные экологические и экономические проблемы, а также проблемы связанные со здоровьем населения негативно влияют на многие стороны развития современного общества. Поэтому, тщательная организация управления системой обращения с ТКО представляет большую социальную значимость и нуждается в постоянных улучшениях.

В данной работе предлагается взглянуть на систему обращения с ТКО с точки зрения различных научных подходов, а именно методов структурного анализа, методов геоинформационных технологий, теории надежности для сложных технических систем, эвергетики, теории графов и методов нечеткой логики, в том числе, аппарата лингвистических переменных. Цель работы – показать возможность применения и системного сочетания вышеперечисленных научных методов, хорошо себя зарекомендовавших в других, свойственных для них областях, в новую область организации системы обращения с ТКО. Однако, простое применение этих подходов невозможно без их дальнейшей адаптации и систематизации с точки зрения уже существующих подходов управления подобными системами.

В рамках данного исследования были выделены элементы системы обращения с ТКО и построена топологическая модель данной системы. Также были построены структурно-логические модели надежности на различных уровнях абстракции.

**Ключевые слова** — мусоропереработка, ТКО, геоинформационные системы, эвергетика, теория надежности, лингвистические переменные.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одними из наиболее актуальных проблем, как для всей России, так и для ее субъектов, являются проблемы в области охраны окружающей среды. Несмотря на то, что в последние годы различные природоохранные организации позитивным образом влияли на сложившуюся ситуацию, качественных перемен в оздоровлении экологической ситуации не произошло. Одной из наиболее пагубных, порождающих все новые и наиболее опасные в плане воздействия на окружающую среду проблем, является нерациональное и неструктурированное обращение с отходами.

В настоящее время проблема сбора, вывоза, хранения и утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) стоит наиболее остро в большинстве регионов России. Так, в среднем на одного жителя мегаполиса приходится порядка 400 кг произведенных отходов в год [1]. Несмотря на огромные цифры, система обращения с ТКО не претерпела значительных изменений. Основными способами обработки отходов все еще остаются захоронение на полигонах, сжигание на специализированных площадках (предприятиях) и частичная переработка.

Несовершенная организация системы обращения с ТКО может привести к ряду проблем, как для различных областей народного хозяйства и экологии, так и для населения. В частности, сопутствующими проблемами плохо организованной системы обращения с ТКО являются возникновение стихийных свалок, переполнение уже существующих полигонов для хранения ТКО и губительные воздействия на экосистему, вызванные вредоносными выбросами в атмосферу. Все это прямым образом влияет на возникновение серьезных проблем со здоровьем у населения, вследствие ухудшения экологической ситуации, санитарно-гигиенических условий проживания отдельных слоев населения и возникновения факторов, способствующих становлению неблагоприятной психосоциальной среды для населения

---

Статья получена 15 августа 2020. ФГБОУ ВО «Уфимский Государственный Технический Университет» (УГАТУ).  
Гвоздев Владимир Ефимович, профессор каф. Технической кибернетики. Дипл. инженер (УАИ, 1977) (wega55@mail.ru)  
Христовуло Ольга Игоревна, профессор, заведующий каф. геоинформационные системы. Дипл. инженер (УАИ, 1991) (o-hristodulo@mail.ru)

События последних дней (эпидемия COVID-19) рельефно обозначили то, что при оценивании альтернативных вариантов построения социотехнических систем с позиций функциональной безопасности необходимо оценивать возможные последствия негативных событий, причем не только тех, которые ранее имели место, но и тех, которые только могут произойти.

Вопросам развития методологических и теоретических основ управления функциональной безопасностью субъектоцентрических систем посвящены работы многих исследователей [2-5]. Тем не менее, требуют дальнейшего развития теоретические основы, позволяющие выполнить научно обоснованную адаптацию разработок, подтвердивших свою эффективность при управлении функциональной безопасностью субъектоцентрических систем иной природы (здравоохранение; авиация; боевые действия и т.д.) в область управления функциональной безопасностью системы обращения ТКО. Нам представляется, что в качестве концептуальной основы обеспечения функциональной безопасности системы обращения с ТКО целесообразно выбрать подход, получивший в литературе наименование «барьерного мышления» (barrier thinking) [6]. Его основу составляет философия «defense-in-depth», разработанная в рамках проведения исследований, связанных с повышением функциональной безопасности атомной промышленности. Фокусом философии является разработка многослойных, эшелонированных систем защиты. При этом исходят из того, что отдельный барьер не сможет полностью предотвратить и устранить негативные последствия опасных воздействий. Однако, построение системы барьеров качественно повышает защитные свойства системы за счет возникновения системного эффекта.

В рамках настоящей работы рассматривается один из подходов к исследованию системы обращения с ТКО, который можно рассматривать как элемент в системе задач построения барьеров (более полно проблематика построения барьеров рассматривается, например, в [7-8]). Научная идея предлагаемого подхода состоит в адаптации методов анализа надежности технических систем в условиях нечетких оценок характеристик надежности элементов применительно к особенностям системы обращения ТКО [9].

## II. ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ ТКО

Управление ТКО в регионе должно начинаться с организации единой системы производственного учета отходов, являющейся первичным информационным потоком [10]. Система первичного производственного учета отходов включает внутреннюю текущую информацию и заключается в количественной оценке

образования отходов для каждой технологической операции как по фактическим показателям образования ТКО, так и по методам материального баланса, а также по расчетным методикам. При экологической оценке жизненного цикла изделия учитывается влияние на природную среду и здоровье людей не только самого материала, но и процессов, сопровождающих его по жизненному циклу: начиная от добычи сырья для его производства и заканчивая его уничтожением, захоронением, или повторным использованием для изготовления новой строительной продукции.

Система обращения с ТКО является разновидностью субъектоцентрической сложной технической системы. Основные элементы системы обращения с ТКО – мусоросортировочные станции, мусороперерабатывающие станции, места захоронения отходов (полигоны), расположенные на определенной местности. Вместе с тем, критическим фактором эффективности системы обращения с ТКО является отношение к ней различных целевых групп субъектов: населения; представителей органов власти; представителей бизнеса; ученых; общественных деятелей. Отмеченное обстоятельство обуславливает необходимость учета при исследовании системы обращения с ТКО субъективной составляющей. И, наконец, при исследовании системы обращения с ТКО необходимо учитывать то, что она является геотехническим объектом, т.е. территориально распределенной системой с уникальным сочетанием в каждом участке территории природной и техногенной составляющих [11-12] и др.

Ввиду этого, во-первых, появляются основания для того, чтобы адаптировать подходы, хорошо зарекомендовавшие себя в других прикладных областях исследования сложных субъектоцентрических технических систем в область обращения с ТКО [13-14]. Во-вторых, следует учитывать ограниченную переносимость получаемых результатов на другие геотехнические системы [15-16].

Наиболее известной метафорой, представляющей суть «барьерного мышления», является предложенная в 1990 году британским ученым J. Reason. Эта модель нашла применение в решении различных задач управления сложными субъектоцентрическими системами разных классов и широко используется в таких сферах, как управление рисками для авиации, инжиниринга и медицины [17-18]. В рамках этой метафоры предполагается анализ альтернативных вариантов построения ложных систем на ранних стадиях их жизненного цикла с тем, чтобы сократить количество ошибок системного характера. В рамках определенного в настоящей работе подхода это означает адаптацию структурных методов анализа надежности технических систем с учетом территориальных особенностей различных компонентов системы обращения с ТКО.

### III. ВЫДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ ТКО ПОСРЕДСТВОМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Представленные ниже результаты получены применительно к системе обращения с ТКО, создаваемой на территории Республики Башкортостан.

В состав территориальной системы обращения с отходами входят: производители отходов – муниципальные округа (МО); структуры переработки отходов – мусоросортировочные станции (МСС), мусороперерабатывающие станции (МПС), полигоны хранения отходов (П); службы сбора и перевозки отходов.

Для выделения элементов системы обращения с ТКО воспользуемся следующими основными принципами анализа территориальных систем – принципом логической завершенности в функциональном смысле и принципом транспортной доступности [19].

Следуя принципу логической завершенности, целью системы обращения с ТКО является непосредственно организация сбора, транспортировки и дальнейшей переработки (захоронения) отходов. Следовательно, элементами системы будут являться производители отходов, в данном случае муниципальные округа, предприятия переработки отходов, здесь это мусоросортировочные станции (МСС), мусороперерабатывающие станции (МПС) и полигоны хранения отходов (П). Данные элементы обеспечивают реализацию поставленной цели системы управления с ТКО [20-21].

Уточним характер взаимосвязи элементов между собой. На уровне муниципальных округов региональный оператор занимается сбором произведенных домохозяйствами и предприятиями отходов, и тем самым решает логически-законченную задачу: собрать все ТКО с территории. Собранные отходы поступают на мусоросортировочные станции для разделения ТКО по видам и классам опасности для их дальнейшей утилизации на специализированных мусороперерабатывающих предприятиях или непосредственно захоронения на полигонах. Возможны случаи транспортировки отходов для их временного хранения на полигонах в случаях временной неспособности МСС и МПС принять ТКО вследствие чрезмерной загрузки либо в случае технических или иных неисправностей оборудования. Следовательно, отдельной функциональной задачей является транспортировка ТКО, что позволяет выделить такой элемент системы как транспортная сеть.

Рассмотрим систему сбора и транспортировки ТКО: всех производителей отходов конкретного муниципального образования обозначим МО, мусоросортировочные станции – МСС, мусороперерабатывающие станции – МПС, полигоны –

П. Также, выделим основные звенья цепи транспортировки отходов: от муниципального образования на полигон (МО → П); от полигона на мусоросортировочную станцию (П → МСС); от мусоросортировочной станции на мусороперерабатывающую станцию (МСС → МПС).

В качестве примера рассмотрим отдельные муниципальные образования Янаульского, Краснокамского, Калтасинского, Бураевского, Татышлинского и Балтачевского муниципальных округов Республики Башкортостан (Рис. 1).

Используем условные обозначения для следующих муниципальных образований: Янаул (МО1), Нефтекамск (МО2), Агидель (МО3), Краснохолмский (МО4), Верхние Татышлы (МО5), Старобалтачево (МО6), Бураево (МО7). Предлагаемые маршруты для транспортировки ТКО от муниципальных образований (МО) до мусоросортировочных станций (МСС) представлены на (Рис. 2).

Для выделения элементов системы обращения с ТКО используем функциональный подход.

С точки зрения функциональной полноты и неделимости, можно выделить следующие группы элементов системы управления отходами:  $\{\{MO\}, \{R\}, \{MCC\}, \{MPP\}, \{P\}\}$ .

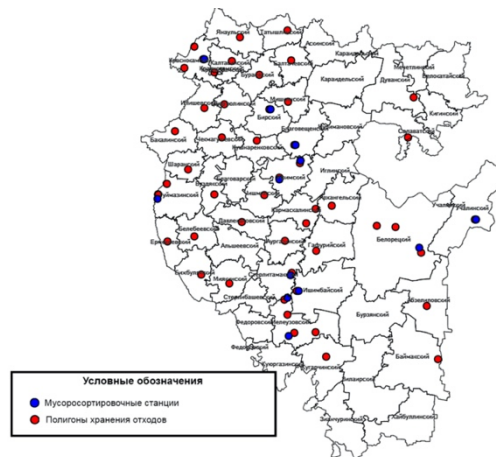


Рис. 1. Карта расположения элементов системы обращения с ТКО на территории Республики Башкортостан



Рис. 2. Фрагмент топологической модели рассматриваемой системы сбора и транспортировки ТКО

Объектами системы являются:  $\{MO\}$  – множество муниципальных образований (узлы графа);  $\{R\}$  – множество маршрутов транспортировки, связывающих объекты (ребра графа);  $\{MCC\}$  – множество мусоросортировочных станций (узлы графа);  $\{МПП\}$  – множество мусороперерабатывающих станций (узлы графа);  $\{П\}$  – множество полигонов (узлы графа).

Преобразуем топологическую модель системы сбора и транспортировки ТКО к виду графа, отражающего различные пути сообщения (дороги) между  $MO$ ,  $П$ ,  $MCC$  (Рис. 3).

Полученные результаты создают основу для использования в дальнейшем формальных методов структурного анализа надежности.

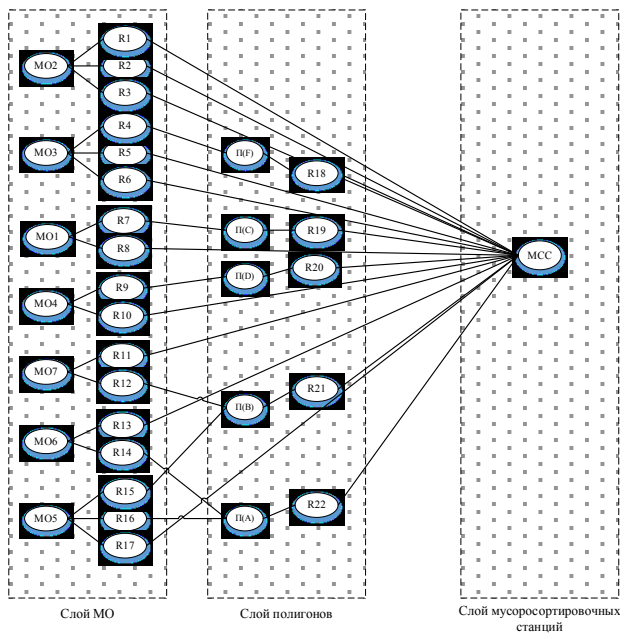


Рис. 3. Модель сетевой структуры системы сбора и транспортировки ТКО

#### IV. СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ РАЗЛИЧНЫМ УРОВНЯМ АБСТРАКЦИИ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТКО

В литературе по теории надежности технических систем подчеркивается, что формулирование понятия «отказ» является основой построения моделей надежности технических систем.

Ввиду сложности и комплексности системы обращения с ТКО, а также ее многоуровневой структуры, формулировка понятия отказа элемента будет разной для каждого уровня системы обращения с ТКО, а именно уровня муниципального образования,

уровня регионального оператора и уровня региона. Поэтому для каждой формулировки понятия отказ будет существовать своя модель надежности системы.

##### A. Структурно-логическая модель надежности на уровне контейнерных площадок

На уровне контейнерных площадок под отказом будем понимать следующее: 1) неспособность регионального оператора по обращению с ТКО организовать сбор ТКО на территории контейнерных площадок (специальные площадки для крупногабаритных отходов, территории, прилегающей к месту погрузки мусора) ввиду таких причин, как отсутствие контейнера на площадке, отсутствие доступа к контейнеру на территории площадки, переполнение установленных на площадке контейнеров хотя бы в одном домохозяйстве; 2) неспособность регионального оператора по обращению с ТКО вывезти ТКО с контейнерных площадок в виду отсутствия или ненадлежащего состояния путей сообщения хотя бы из одного домохозяйства.

На данном уровне абстракции функциональными элементами системы будут являться:  $\{MO, R\}$ , где под  $MO$  понимается контейнерная площадка для сбора ТКО для муниципального образования, а  $\{R\}$  – транспортные пути между контейнерными площадками для сбора ТКО и мусоросортировочными станциями или полигонами.

В рамках введенных определений контейнерной площадке может быть поставлена в соответствие структурно-логическая модель (Рис. 4).

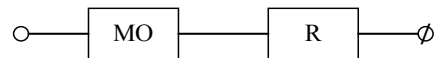


Рис. 4. Структурно-логическая модель надежности системы на уровне контейнерной площадки

##### B. Структурно-логическая модель надежности на уровне муниципального образования

В случае существования множества площадок и нескольких путей сообщения (дорог) от контейнерных площадок до мусоросортировочных станций или полигонов при тех же формулировках понятия отказ, структурно-логическая модель принимает, представленный на рисунке 5. В этой модели учитывается то обстоятельство, что до  $i$ -й контейнерной площадки ( $MO_i$ ) можно доехать разными путями  $\{R_{i,j}\}$ .

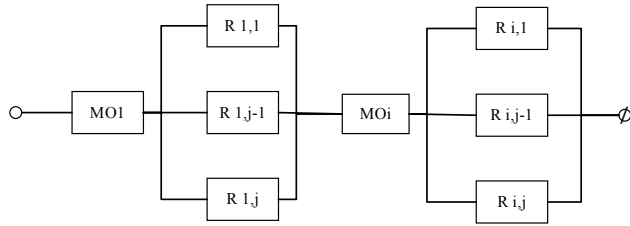


Рис. 5. Структурно-логическая модель надежности системы на уровне муниципального образования

V. КАЧЕСТВЕННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ТКО

Основу получения количественных оценок показателей надежности на основе структурно-логических схем составляет использование вероятностей отказов (безотказной работы) элементов, входящих в состав схем. При анализе надежности технических систем показатели надежности либо представлены в паспортных данных на элементы, либо могут быть получены посредством специально организованных испытаний. При анализе систем обращения с ТКО получить показатели надежности посредством упомянутых подходов не представляется возможным. В силу этого для получения качественных оценок надежности предлагается использовать подход, описанный в [22]. В упомянутой работе описана процедура оценивания путей в графе для случая, когда ребрам графа ставятся в соответствие веса в виде значений заранее сформированной линейно упорядоченной лингвистической шкалы (примером лингвистической шкалы применительно к задачам надежности может быть, например, {невероятно, маловероятно, вероятно}). Следуя этой процедуре, если в структурно логической схеме имеет место последовательное соединение элементов, оценкой надежности будет наименьшая из лингвистических оценок, которые ставятся в соответствие каждому из элементов. В случае параллельного соединения оценкой будет наибольшая из оценок. На рисунках 6-7 приведены примеры, соответствующие последовательному и параллельному соединению элементов структурно-логических схем.



Рис. 6. Последовательное соединение элементов, взвешенных лингвистическими оценками

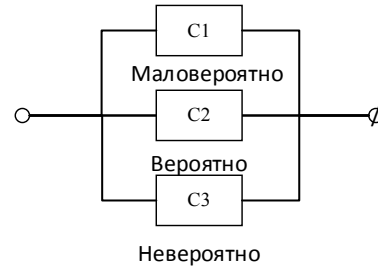


Рис. 7. Параллельное соединение элементов, взвешенных лингвистическими оценками

Для примера, приведенного на рисунке 6, итоговой оценкой будет  $\min\{\text{маловероятно, вероятно, невероятно}\} = \text{невероятно}$ . Для примера, приведенного на рисунке 7, итоговой оценкой будет  $\max\{\text{маловероятно, вероятно, невероятно}\} = \text{вероятно}$ . Использование линейно упорядоченных лингвистических переменных позволяет получить качественные оценки характеристик надежности для моделей контейнерных площадок и муниципальных образований.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый подход, основанный на системном сочетании возможностей геоинформационных технологий, аппарат теории надежности и положений эвристики, позволяет получать качественные оценки надежности компонент системы обращения с отходами. Это делает возможным формализовать процедуру сравнения альтернативных вариантов выбора мест расположения элементов системы обращения с ТКО на ранних стадиях проектирования геотехнической системы. Предлагаемый подход является одним из практических приемов реализации «барьерного мышления» в такой социально значимой сфере как обращения с отходами.

Результаты исследований, представленные в статье, частично поддержаны грантом РФФИ 18-08-00885-а «Методологические основы многокритериального управления процессом выбора местоположения промышленных предприятий по переработке отходов на основе положений эвристики».

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Косолапов Н. А. Статистика ТБО в России // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2014. Т. 26. С. 581–585.
- [2] Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1977. 536 с.
- [3] Parkinson D.B. Parameter Design in System Reliability // Quality Technology & Quantitative Management, Volume 3, 2006 - Issue 1, pp.93-102, DOI: 10.1080/16843703.2006.11673102
- [4] Lin Y.-K., Kuo P.-H., Chang C.-C. System reliability for joint minimal paths under time constraint // Journal of the Chinese Institute of Engineers, Volume 37, 2014 - Issue 1, pp. 110-121, DOI: 10.1080/02533839.2012.747250

- [5] Chavaillaz A., Sauer J. Operator adaptation to changes in system reliability under adaptable automation // *Ergonomics*, Volume 60, 2017 - Issue 9, pp.1261-1272, DOI: 10.1080/00140139.2016.1261187
- [6] BowTieXP. The next generation BowTie methodology tool. BowTie Methodology Manual. Revision 15. (27 Mar-2015). 64 p.
- [7] TRIPOD BETA. Guidance on using Tripod Beta in the investigation and analysis of incidents, accidents and business losses. February 2015. Version 5.01. 92 p.
- [8] Виттих В.А. Неоднородный актор и повседневность как ключевые понятия эвергетики: препринт – Самара: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления сложными системами РАН, 2014. – 12с.
- [9] Растринин Л. А. Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
- [10] Цховребов Э.С., Величко Е.Г. Научно-методологические подходы к созданию модели комплексной системы управления потоками строительных отходов // *Вестник МГСУ*. 2015. № 9. С. 95—110
- [11] Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с
- [12] Михайлов Н.И. Физико -географическое районирование. М.: Изд-во МГУ, 1985.
- [13] Щербатов И.А., Проталинский О.М. Сложные слабоформализуемые многокомпонентные технические системы // *Управление большими системами: сборник трудов*. 2013. № 45. С. 30-46.
- [14] Кудж С.А. Многоаспектность рассмотрения сложных систем // *Перспективы науки и образования*. 2014. № 1 (7). С. 38-43.
- [15] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. Санкт-Петербург: Наука, 2000. 549 с.
- [16] Синергетические методы управления сложными системами / А. А. Колесников [и др.]; под общ. ред. А. А. Колесникова. М.: URSS, 2006. 300 с.
- [17] Reason J. Human error: models and management. *BMJ*. 2000; 320:768–70. DOI: 10.1136/bmj.320.7237.768.
- [18] Reason J. *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Aldershot, UK: Ashgate; 1997.
- [19] Вельможин А. В. Теория транспортных процессов и систем: учебник для вузов / А. В. Вельможин, В. А. Гудков, Л. Б. Миротин. М.: Транспорт, 1998. 167 с.
- [20] Гвоздев В.Е., Христуло О.И. Информационная поддержка принятия решений в задачах управления отходами на основе математико-геоинформационного моделирования // *Информационные технологии*. 2019. Т. 25. № 8. С. 482-489.
- [21] Гвоздев В.Е., Христуло О.И., Сазонова Т.В., Фахретдинова Э.Б. Использование технологий геоинформационного и математического моделирования для оценки обоснованности выбора местоположения предприятий по переработке отходов // *Auditorium*. 2018. № 3 (19). С. 63-72.
- [22] C. Enrique Pelaz, John B. Bowles. Using Fuzzy Cognitive Maps as a System Model for Failure Modes and Effects Analysis // *INFORMATION SCIENCES* 88, 177-199 (1996).

# Formal procedure for analyzing the properties of a solid municipal waste management system based on the provisions of energetics, reliability theory apparatus, and GIS technologies

Gvozdev V. E., Khristodulo O. I.

**Abstract** — at present, the problem of organizing a system for handling municipal solid waste (MSW) is most acute, as in most Russian regions, and throughout the world. Various environmental and economic problems, as well as problems related to public health, negatively affect many aspects of the development of modern society. Therefore, careful management of the MSW management system is of great social importance and needs constant improvement.

In this paper, we propose to look at the MSW management system from the point of view of various scientific approaches, namely, methods of structural analysis, methods of geoinformation technologies, reliability theory for complex technical systems, energetics, graph theory, and fuzzy logic methods, including the apparatus of linguistic variables. The purpose of the work is to show the possibility of applying and combining the above-mentioned scientific methods, which have proven themselves in other areas peculiar to them, in a new area of organization of the MSW management system. However, the simple application of these approaches is impossible without their further adaptation and systematization in terms of existing approaches to managing such systems.

In this study, elements of the MSW management system were identified and a topological model of this system was constructed. Structural and logical models of reliability were also constructed at various levels of abstraction.

**Keywords** — waste management, MSW, geographic information systems, Energetika, reliability theory, linguistic variables.

## REFERENCES

- [1] Kosolapov N. A. statistics of solid waste in Russia // Scientific and methodological electronic journal "Concept". 2014. Vol. 26, Pp. 581-585.
- [2] Druzhinin G. V. Reliability of automated systems. 3rd ed., reprint. and add. M., "Energy", 1977. 536 p.
- [3] Parkinson D.B. Parameter Design in System Reliability // Quality Technology & Quantitative Management, Volume 3, 2006 - Issue 1, pp.93-102, DOI: 10.1080/16843703.2006.11673102
- [4] Lin Y.-K., Kuo P.-H., Chang C.-C. System reliability for joint minimal paths under time constraint // Journal of the Chinese Institute of Engineers, Volume 37, 2014 - Issue 1, pp. 110-121, DOI: 10.1080/02533839.2012.747250
- [5] Chavaillaz A., Sauer J. Operator adaptation to changes in system reliability under adaptable automation // Ergonomics, Volume 60, 2017 - Issue 9, pp.1261-1272, DOI: 10.1080/00140139.2016.1261187
- [6] BowTieXP. The next generation BowTie methodology tool. BowTie Methodology Manual. Revision 15. (27 Mar-2015). 64 p.
- [7] TRIPOD BETA. Guidance on using Tripod Beta in the investigation and analysis of incidents, accidents and business losses. February 2015. Version 5.01. 92 p.
- [8] Vittikh V. A. Heterogeneous actor and everyday life as key concepts of energetics: Preprint – Samara: Federal state budgetary institution of science Institute of problems of management of complex systems of the Russian Academy of Sciences, 2014. – 12s.
- [9] Rastrigin L. A. Adaptation of complex systems. Riga: zinatne, 1981. 375 p.
- [10] Tskhovrebov E. S., Velichko E. G. Scientific and methodological approaches to creating a model of an integrated system for managing construction waste flows // MSU Bulletin. 2015. No. 9. S. 95-110
- [11] Reimers N. F. Nature Management. Dictionary-reference. Moscow: Mysl, 1990. 637 p
- [12] Mikhailov N. I. Physical and geographical zoning, Moscow: MSU publishing house, 1985.
- [13] Shcherbatov I. A., Protalinsky O. M. Complex weakly formalized multicomponent technical systems // management of large systems: collection of works. 2013. no. 45. Pp. 30-46.
- [14] Kuj S. A. multi-Aspect consideration of complex systems // Prospects of science and education. 2014. No. 1 (7). pp. 38-43.
- [15] Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems. Saint Petersburg: Nauka, 2000. 549 p.
- [16] Synergetic methods for managing complex systems / A. A. Kolesnikov [et al.]; under the General editorship of A. A. Kolesnikov. M.: URSS, 2006. 300 p.
- [17] Reason J. Human error: models and management. BMJ. 2000; 320:768–70. DOI: 10.1136/bmj.320.7237.768.
- [18] Reason J. Managing the Risks of Organizational Accidents. Aldershot, UK: Ashgate; 1997.
- [19] Velmozhin A.V. theory of transport processes and systems: textbook for universities / A.V. Velmozhin, V. A. Gudkov, L. B. Mirotin. M.: Transport, 1998. 167 p.
- [20] Gvozdev V. E., Khristodulo O. I. Information support for decision-making in waste management problems based on mathematical and geoinformation modeling // Information technologies. 2019. Vol. 25. No. 8. Pp. 482-489.
- [21] Gvozdev V. E., Khristodulo O. I., Sazonova T. V., fakhretdinova E. B. Using geoinformation and mathematical modeling technologies to assess the validity of choosing the location of waste processing enterprises // Auditorium. 2018. No. 3 (19). pp. 63-72.
- [22] C. Enrique Pelaz, John B. Bowles. Using Fuzzy Cognitive Maps as a System Model for Failure Modes and Effects Analysis // INFORMATION SCIENCES 88, 177-199 (1996).