

УДК 519.876.5

Копырин А.С.

ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, e-mail: kopyrin_a@mail.ru

Бурунин О.А.

ФГБОУ ВО «Сочинский государственный университет», Сочи, e-mail: kafedraIT@sutr.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЫНКА УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ ГОРОДА-КУРОРТА

Ключевые слова: имитационное моделирование, курортный город, вывоз твердых бытовых отходов.

Статья посвящена методике построения и валидации многоподходной компьютерной имитационной модели. Объектом моделирования является сбор, вывоз и утилизацию твердых бытовых отходов курортного города (на примере г. Сочи). Построенная модель позволяет анализировать сложную городскую систему с учетом большого количества факторов и элементов неопределенности, прогнозировать будущее состояние системы, а также выявлять взаимосвязи и аномалии. Администрация города и частные компании могут использовать полученный инструмент при подготовке управленческих решений на этом социально значимом рынке. Статья включает обоснование актуальности темы исследования, определение цели исследования. Обоснован выбор в качестве метода многоподходного моделирования; представлена когнитивная модель и блок-схема системы взаимодействия населения и формирования мусорных потоков. Предложена дискретно-событийная диаграмма состояний объектов в агентной модели сборки мусора и демонстрируются выполненные процедуры верификации модели.

Введение

Развитие туристического сектора экономики является одним из приоритетов, поставленных руководством Краснодарского края и России. Однако экономическое развитие региона сопровождается усилением антропогенной нагрузки на территорию и вызывает экологические проблемы. Одной из таких проблем является вывоз и утилизация твердых бытовых отходов (ТБО).

Технологии, в настоящее время используемые для сбора, хранения и утилизации твердых отходов, являются устаревшими и неадекватными природно-климатическим условиям территории и рекреационным требованиям курорта Сочи. Отходы практически не используются в качестве вторичных материальных ресурсов, из-за чего ценные компоненты, пригодные для переработки после соответствующей настройки, необратимо теряются. Программа Zero Waste, принятая в рамках подготовки к Олимпийским играм, так и не была реализована.

Следует также отметить, что утилизация ТБО является социально значимым рынком, а отсутствие современных технологий, с одной стороны, и строгих санитарных норм, с другой, резко уве-

личивает стоимость услуг. Утилизация твердых отходов в Сочи является самой дорогой в регионе [1].

Цель исследования: в целях оптимизации системы управления утилизацией твердых бытовых отходов в настоящее время необходимо применять передовые методы и инструменты, основанные на достижениях российских и зарубежных ученых. Одним из таких методов является построение компьютерной имитационной модели и последующий сценарный анализ с целью выявления преимуществ и недостатков различных концепций развития изучаемой сферы [2].

Объектом исследования является система образования, вывоза и утилизации твердых бытовых отходов в городе Сочи. Предметом исследования является взаимодействие населения города, организация вывоза мусора и туристических потоков. Целью работы является построение интегрированной компьютерной модели, с помощью которой будет возможно:

- изучить тенденции развития конкретного рынка;
- провести анализ сценариев и имитационное моделирование для определения возможных последствий управленческих решений.

Информационной базой исследования являются открытые статистические данные Федеральной службы государственной статистики, Администрации города Сочи и Министерства топливно-энергетического комплекса и ЖКХ Краснодарского края.

Материал и методы исследования

Обзор существующих моделей

Много публикаций были посвящены моделированию утилизации твердых отходов, но эти исследования в основном сосредоточены на одной стороне проблемы. В одной части работ рассматривается логистика вывоза мусора различными видами транспорта [3, 4], в другой – экологическая проблема накопления мусора [5, 6, 7, 8], в третьей – экономическая сторона процесса [9, 10, 11].

Авторы попытались разработать единую синтетическую модель, сочетающую социальные, экономические и экологические аспекты предмета исследования. Технологической основой работы является многоподходное моделирование, сочетающее системную динамику, дискретно-событийное и агентное моделирование [12].

Описание объекта исследования

В городе Сочи насчитывается более 300 лечебно-оздоровительных комплексов, гостиниц и туристических баз различного уровня комфортности общей вместимостью около 200 тыс. мест. Ведущую роль в отраслевой структуре региона занимают курортно-туристические комплексы, величина и доля которых в валовом региональном продукте со временем увеличиваются. Экономика региона ориентирована на туризм и его обслуживание. В сфере материального производства лидируют строительство, пищевая промышленность и сельское хозяйство. Туристические потоки в Сочи достигают 4500-4800 тысяч человек в год. Основная их часть приходится на период с апреля по октябрь, то есть максимальный наплыв туристов приходит летом.

Система очистки территории Сочи регулируется «территориальной схемой обращения с отходами, в том числе с твердыми бытовыми отходами в Крас-

нодарском крае» [13], в соответствии с которой планировалось строительство мусоросортировочного комплекса (МСК) мощностью 200 тыс. тонн в год с компостирующим заводом. Второй этап включал строительство завода по компостированию органических отходов и цеха по переработке пластмасс.

Из всех объектов на МСК в 2018 году была введена в эксплуатацию только станция по сортировке отходов, мощностью 200 тысяч тонн в год (500-600 тонн в день). Запуск второго этапа был отменен.

В настоящее время на территории города Сочи, от Красной Поляны до села Детляжка Лазаревского района, организована следующая система управления ТБО: сбор ТБО, его транспортировка на станцию сортировки, ручная сортировка, прессование и упаковка твердых отходов в брикеты, транспортировка упакованных брикетов и органических отходов автомобильным транспортом на полигон в Белореченске Краснодарского края. Расстояние от Сочи (Центральный район) до Белореченской свалки ТБО составляет 250 км (через Шаумянский перевал), или 325 км через Горячий Ключ, в обе стороны – 650 км.

Для Лазаревского района от Детляжки до Магри схема управления имеет вид: сбор твердых отходов, вывоз мусоровозами до Белореченского полигона ТБО [6, 14]. Логистическое плечо от Лазаревского до полигона в Белореченском районе через город Горячий Ключ составляет 500 км (в обе стороны). Такие большие расстояния для транспортировки ТБО до полигона требуют значительного количества мусоровозов, что увеличит нагрузку на дороги и загрязнение воздуха, а также выбросы вредных веществ из автотранспорта.

При такой схеме очистки ТБО в Сочи вся органическая часть ТБО поступает на свалку, что негативно влияет на состояние окружающей среды.

ТБО сортируются с низким процентом сбора переработанных материалов (7% фракций отходов), а вывоз практически всего объема сочинского мусора на свалку невыгоден. Таким образом, можно сделать вывод, что разработка и внедрение современной системы очистки городских ТБО крайне необходимы.

Текущая мощность МСК рассчитана на 200 тысяч тонн в год, а средний объем образования твердых отходов скоро достигнет 330-400 тысяч тонн в год [12]. Летом объем образования твердых отходов превышает средний уровень на 30%

Когнитивная модель

Представим когнитивную модель рынка вывоза и утилизации ТБО на высоком уровне абстракции. Основными факторами, влияющими на поступление твердых бытовых отходов, являются постоянное население и количество туристов. Увеличение количества отходов

влияет на загрязнение окружающей среды, что в свою очередь снижает комфорт проживания на территории и увеличивает заболеваемость. Увеличение заболеваемости снижает среднюю продолжительность жизни и, следовательно, население. Снижение комфорта окружающей среды негативно сказывается на туристическом потоке и населении (усиливается эмиграция из города).

После формализации модель приобретает вид, показанный на рис. 1.

Описание показателей когнитивной модели представлено в таблице 1, а отношения – в таблице 2.

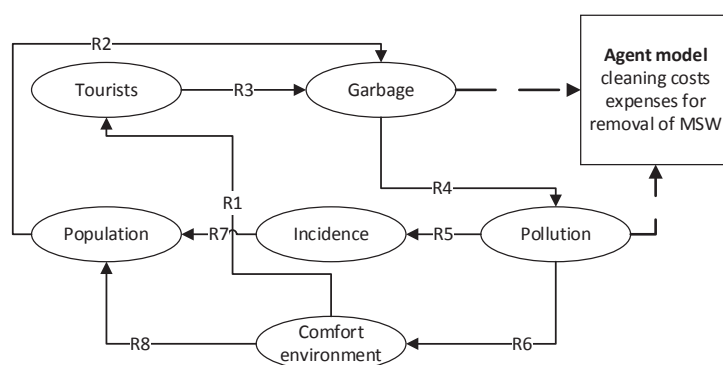


Рис. 1. Когнитивная модель общих отношений.

Таблица 1

Показатели когнитивной модели

Показатель	Описание	Единица измерения
Population	Население, количество людей, постоянно проживающих в городе	чел.
Tourists	Туристы, среднеемесячное количество туристов	чел.
Garbage	Мусор, объем аккумулированных ТБО в городе	тонн
Pollution	Загрязнение, уровень загрязнения окружающей среды	усл.ед.
Incidence	Заболеваемость, среднеемесячное количество заболевших людей	чел./мес.
Comfort environment	Комфортность среды	усл.ед.

Таблица 2

Взаимосвязи когнитивной модели

Связь	Описание	Тип
R1	Comfort environment – Tourists, Комфортность среды – Туристы	Прямая
R2	Population – Garbage, Население – Мусор	Прямая
R3	Tourists – Garbage, Туристы – Мусор	Прямая
R4	Garbage – Pollution, Мусор – Загрязнение	Прямая
R5	Pollution – Incidence, Загрязнение – Заболеваемость	Прямая
R6	Pollution – Comfort environment, Загрязнение – Комфортность среды	Обратная
R7	Incidence – Population, Заболеваемость – Население	Обратная
R8	Comfort environment – Population, Комфортность среды – Население	Прямая

Результаты исследования и их обсуждение

Построение имитационной модели

На основе когнитивной модели в среде моделирования Anylogic была построена потоковая диаграмма

Все переменные в потоковой диаграмме делятся на 3 типа:

- переменные уровня (или состояния), связанные потоками;
- переменные темпа, регулирующие изменение уровней;
- вспомогательные переменные.

Математический аппарат модели представляет собой систему дифференциальных уравнений.

На рис. 2 приведена потоковая диаграмма модели. Она содержит 3 уровня и 17 переменных. Ключевые факторы когнитивной модели выделены цве-

том. Блок-схема также содержит связь с агентной моделью через переменную AgentModelRemoval. Описание уровней и переменных представлено в таблице 3.

Агентская часть модели включает в себя 3 класса объектов:

- комплекс по сортировке отходов;
- мусоровоз, собирающий отходы с контейнерных площадок и вывозящий его на МСК;
- крупнотоннажный грузовик, перевозящий отсортированные и прессованные отходы на свалку в Белореченске.

Комплекс генерируется в единственном числе; диаграмма дискретных событий показана на рис. 3. Мусоровозы и транспортные средства создаются по мере необходимости, в зависимости от объема отходов, но не более максимального количества доступных специальных транспортных средств.

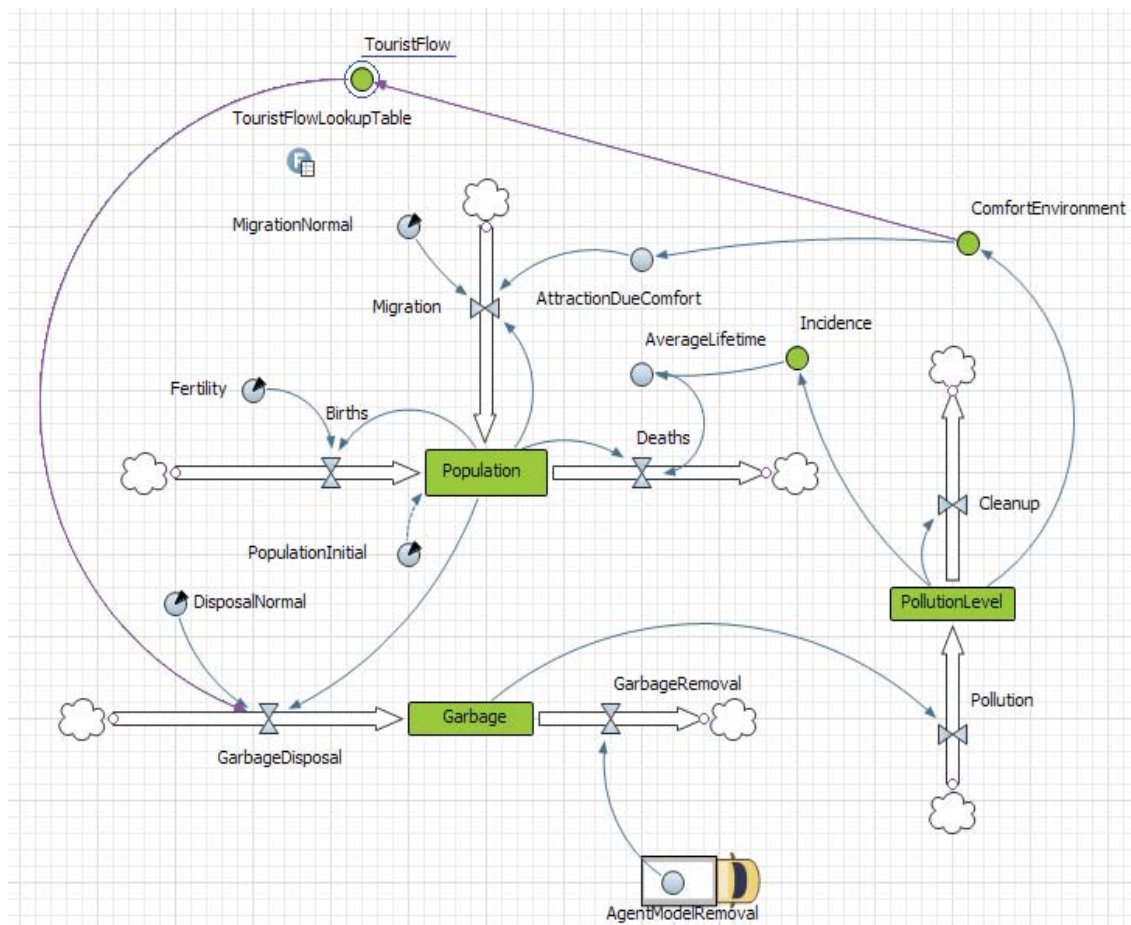


Рис. 2. Блок-схема модели

Таблица 3

Описание переменных потоковой диаграммы

Переменная	Описание	Обозначение	Уравнение
Population	Население	P	$P(t+dt)=P(t)+B(t)*dt-D(t)*dt+M(t)*dt$
Garbage	Мусор	G	$G(t+dt)=F(t)+GD(t)*dt-GR(t)*dt$
PollutionLevel	Уровень загрязнения	PL	$PL(t+dt)=PL(t)+Po(t)*dt-CU(t)*dt$
Births	Рождаемость	B	$P*F$, (F – Коэффициент рождаемости – 0.0152)
Deaths	Смертность	D	$D=P/AL$
Migration	Миграция	M	$M=P*MN*AC$, (MN –Коэффициент миграции – 0.0231)
GarbageDisposal	Вывоз мусора	GD	$GD=(P+TF*0.3101)*DN$, (DN – Disposal Normal – 0.251)
GarbageRemoval	Удаление ТБО	GR	$GR=AMR$ (связь с агентской моделью)
Pollution	Загрязнение окружающей среды	Po	$Po=(G/243000)/(1-(G/234000)*2)^{0.5}$
CleanUp	Очистка окружающей среды	CU	$CU=PL/15$
ComfortEnvironment	Комфортность среды	CE	$CE=1-PL$
Incidence	Заболеваемость	IN	$IN=PL$
AverageLifetime	Средний срок жизни	AL	$AL=69.5-In*1.5359$
AttractionDueComfort	Привлекательность курорта	AC	$AC=0.414*CE+0.814$
TouristsFlow	Поток туристов	TF	$TF=TFLT*CE$, (TFLT – статистическая табличная функция)

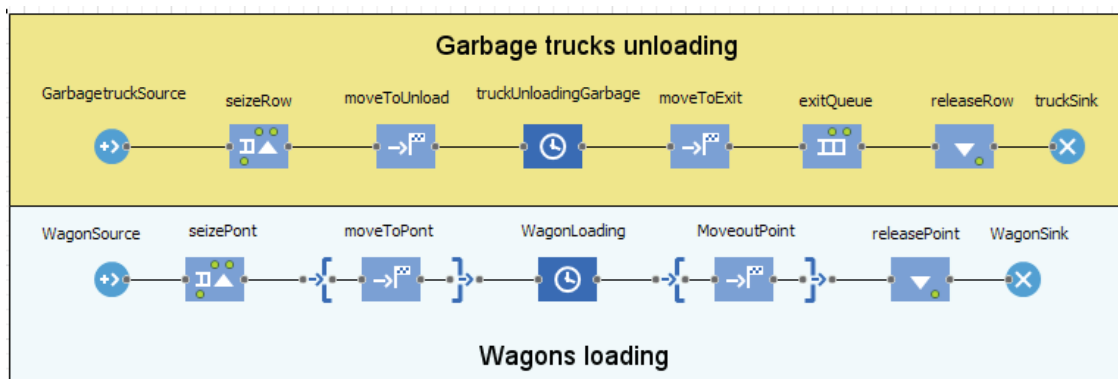


Рис. 3. Диаграмма состояния модели комплекса сортировки отходов.

Верификация модели

Для повышения уровня достоверности результатов моделирования были проведены формальные процедуры верификации модели.

Проверка (валидация) модели выполняется с целью улучшения модели и проверки ее достоверности, то есть насколько хорошо полученная модель

описывает поведение моделируемой системы. При проверке модели структура и переменные (например, начальные условия и константы) могут быть уточнены, то есть модель откалибрована.

В ходе выполнения формальных процедур валидации были проверены логические взаимосвязи, чтобы подтвердить правильность структуры имитационной

модели. Проверка была сделана с фактическими доступными статистическими данными.

Например, приведем соотношение ретроспективных фактических данных и результатов, полученных моделью, по 2 параметрам: население и вывоз мусора. Все исходные данные соответствуют развитию системы в период с 2012 по 2017 год. Шаг моделирования – 1 год; горизонт моделирования 2017. Результаты прогноза приведены на рис. 4, 5.

Как видно на представленных рисунках моделирование воспроизводит актуальную статистику. В первом эксперименте средняя ошибка отклонения составляет 2,45%, а во втором – 3,26%.

Выводы или заключение

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы.

1. Разработана многоподходная модель системы утилизации ТБО в Сочи, которая позволяет изучать тенденции развития рынка, а также анализ сценариев последствий различных управленческих решений.

2. Использование этого инструмента для среднесрочного и долгосрочного планирования предоставит лицу, принимающему решение, больше информации в условиях неопределенности, что позволит избежать многих ошибок в управлении.

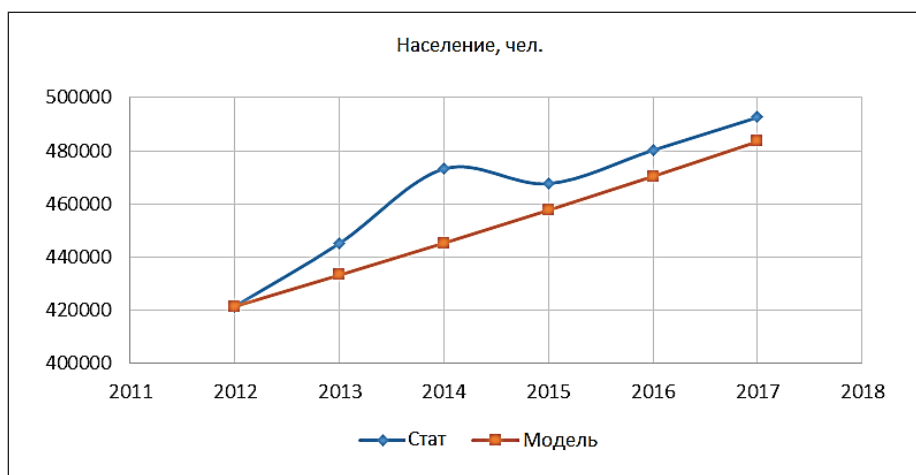


Рис. 4. Результаты моделирования по показателю «Население»

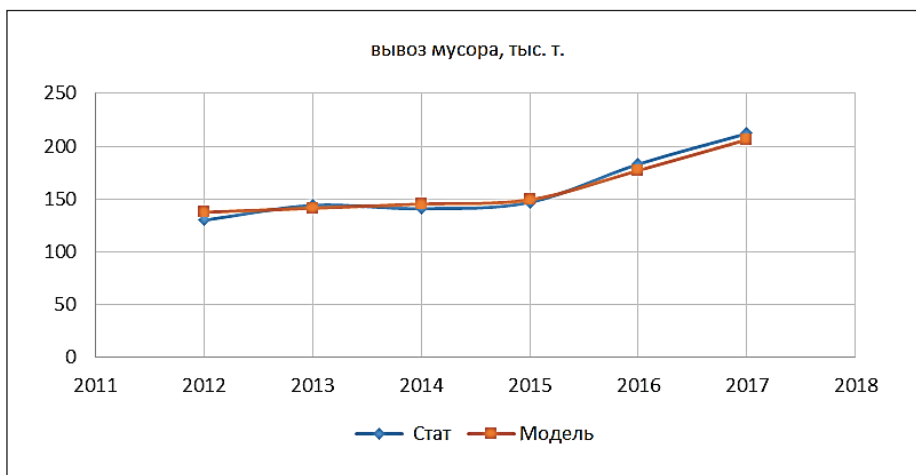


Рис. 5. Результаты моделирования по показателю «Вывоз мусора»

3. Точность модели основана на общедоступных статистических данных. К сожалению, эти данные не являются полными и не включают в себя множество показателей, значения которых в модели были получены методом экспертных оценок.

В дальнейшем, предполагается уточнить и скорректировать модель

с использованием более новых статистических данных; организовать вычислительные эксперименты, которые выявят экономические тенденции влияния сложных программ и сценариев на развитие рынка ТБО, как с точки зрения муниципалитета, так и частных компаний.

Библиографический список

1. Сметанин В.И., Красовская С.П., Щекудов Е.В., Воробьев Л.А. Динамика образования и накопления отходов производства и потребления в курортных городах (на примере города Сочи) // Природообустройство. – 2012. – № 1. – С. 7-13.
2. Antmann E.D., Celik N., Shi X., Dai Y. Simulation-based optimization of solid waste management and recycling programs // IIE Annual Conference. Proceedings. – Institute of Industrial and Systems Engineers (IIE). – 2012. – P. 759-768.
3. Апталаев М.Н., Жалко М.Е., Балабанов Д.С., Калинина К.А. Применимость методов имитационного моделирования при решении задачи оптимизации специализированного автомобильного парка для сбора и вывоза твердых коммунальных отходов // Отходы и ресурсы. – 2017. – №4. – URL: <https://resources.today/PDF/12RRO417.pdf>
4. Манаев К., Мельников А.Н. Оптимизация автомобильного и контейнерного парка при сборе и вывозе твердых бытовых отходов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – № 10 (171). – С. 130-134.
5. Cremiato R., Mastellone M.L., Tagliaferri C., Zaccariello L., Lettieri P. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery and secondary fuels production // Renewable Energy. – 2018. – Т. 124. – С. 180-188.
6. Гутова Н.И., Шостак А.А. Проблемы утилизации отходов г. Сочи // Курортно-рекреационный комплекс в системе регионального развития: инновационные подходы. – 2017. – № 1. – С. 97-100.
7. Podchashinskiy Y., Kotsiuba I., Yelnikova T. Math modeling and analysis of the impact of municipal solid waste landfill leachate on the environment // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 1 (10). – С. 4-10.
8. Shanmugam, Mageswari & Lakshmanan, Iyappan & Aravind, S & Mohammed, Sameer & Vignesh, R & Vinoth Kumar, P. Contamination of Groundwater Quality Due to Municipal Solid Waste Disposal – A GIS-Based Study in Perungudi Dump Yard // International Journal of Engineering and Technology. – 2017. – № 4. – P. 952-964.
9. Белоусов М.Ю. Влияние социально-экономических факторов на решение муниципальных властей о выборе формы организации рынка социально значимых услуг (на примере услуг по вывозу твердых бытовых отходов в России) // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2010. – Т. 14. – № 3. – С. 379-394.
10. Арустамов Э.А. Обращение с отходами и создание мусоросжигательных заводов в России и Московской области // Отходы и ресурсы. – 2018. – № 2. – URL: <https://resources.today/PDF/05ECOR218.pdf>
11. Проскурникова И.А. Методологические основы эколого-экономического подхода к утилизации твердых бытовых отходов с использованием мусоросжигательного завода // ГИАБ. – 2013. – № 3 (1). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologicheskie-osnovy-ekologo-ekonomicheskogo-podhoda-k-utilizatsii-tverdobytyh-othodov-s-ispolzovaniem-musoroszhigatel'nogo>).
12. Kopyrin A. Simulation modelling of the municipal sanatorium-tourist branch // MATEC Web Conf. 170 01030 – 2018.
13. Постановление главы администрации (губернатора) Краснодарского края от 26 сентября 2016 года № 747 «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, в Краснодарском крае».
14. Соломин И.А. Элементы разработки экологически безопасной городской системы переработки твердых бытовых отходов на примере города Сочи // Природообустройство. – 2015. №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elementy-razrabotki-ekologicheskii-bezopasnoy-gorodskoy-sistemy-pererabotki-tverdyyh-bytovyyh-othodov-na-primere-goroda-sochi>.