



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕОРИИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ И АНАЛИЗА СИСТЕМ РАБОТЫ С ОТХОДАМИ В МЕГАПОЛИСАХ

В. В. Рубинов

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Актуальность организации эффективной системы работы с отходами в современном мире не вызывает сомнений. Необходимо понимать, что отходы могут являться не только источником экологической опасности, но и средством получения прибыли и вторичных материальных ресурсов. Сфера работы с отходами сильнее всего зависит от системы транспорта, то есть, наиболее чувствительна к организации эффективной транспортной работы. В статье описан современный технологический процесс работы с отходами. Описаны принципы и акты, регулирующие детальность. Рассмотрены математические модели описывающие современный процесс работы с отходами на уровне маршрутов. Определены проблемы в практической плоскости. Оценена возможность описания системы через теорию систем массового обслуживания. Определены виды систем массового обслуживания на разных уровнях планирования применимые к описанию системы работы с отходами. Определен круг задач, которые можно решить через теорию системы массового обслуживания. Определены направления дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, мусор, система обращения отходов, транспортное предприятие, переработка, системы массового обслуживания, математические модели, система двухэтапного вывоза, эффективность, многоканальная система массового обслуживания с очередью, уровни планирования.

Для цитирования:

Рубинов В. В. Использование математических моделей теории систем массового обслуживания для описания и анализа систем работы с отходами в мегаполисах // Системный анализ и логистика: журнал. выпуск №4(34), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2022 – с.28-35. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-28-35.

USE OF MATHEMATICAL MODELS OF THE THEORY OF QUEUING SYSTEMS FOR DESCRIPTION AND ANALYSIS OF WASTE MANAGEMENT SYSTEMS IN MEGA CITIES

V. V. Rubinov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The relevance of organizing an effective waste management system in the modern world is beyond doubt. It must be understood that waste can be not only a source of environmental hazard, but also a means of making a profit and secondary material resources. The area of waste management is most dependent on the transport system, that is, it is most sensitive to the organization of effective transport work. The article describes the modern technological process of working with waste. The principles and acts regulating the detail are described. Mathematical models describing the modern process of working with waste at the level of routes are considered. Problems in the practical plane are defined. The possibility of describing the system through the theory of queuing systems is estimated. The types of queuing systems at different levels of planning applicable to the description of the waste management system are determined. The range of problems that can be solved through the theory of the queuing system is determined. Directions for further research in this area are determined.

Keywords: municipal solid waste, garbage, waste management system, transport enterprise, processing, queuing systems, mathematical models, two-stage removal system, efficiency, multi-channel queuing system, planning levels.

For citation:

Rubinov V. V. Use of mathematical models of the theory of queuing systems for description and analysis of waste management systems in mega cities // System analysis and logistics.: №4(34), ISSN 2007-5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2022 –p. 28-35. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-28-35.

Введение

Актуальность организации эффективной системы работы с отходами в современном мире не вызывает сомнений. В России прекрасно понимают важность вопросов, связанных с системой работы с отходами. Для крупных городов России, таких как Санкт-Петербург, остро стоит проблема утилизации твердых бытовых отходов [1]. Необходимо понимать, что отходы



могут являться не только источником экологической опасности, но и средством получения прибыли и вторичных материальных ресурсов.

Проблема, связанная с отходами, преследует человечество со времени его возникновения. Меняются лишь причины и следствия. Например, раньше проблемы были связаны с недостаточным развитием цивилизации, теперь, наоборот, с «чрезмерным».

Проблема отходов носит комплексный характер и связана в большей степени с экономическими и гуманитарными причинами. В слаборазвитых странах проблема утилизации отходов носит катастрофический характер, в развитых проблем сильно меньше. Для повышения эффективности системы необходимы серьезные доработки в каждой из сфер касающейся работы с твердыми коммунальными отходами (далее ТКО): правовой, экономической, экологической, технической, социальной. Организация процесса работы с отходами, одна из серьезнейших задач на стыке бизнеса и государства [2].

Описание современной системы работы с отходами

Организация эффективности движения потоков отходов от мест накопления через места перегрузов к местам утилизации или захоронения регулируются территориальной схемой обращения с отходами.

Территориальные схемы обращения с отходами – совокупность различных описаний системы организации и осуществления деятельности по работе с отходами, образующихся на территории субъекта Российской Федерации, и направлений ее развития на определенный период [3].

Схема отражает также на период своего действия финансово-экономические показатели деятельности по обращению с отходами, включая инвестиционные и организационные аспекты взаимодействия участников рынка обращения с отходами, может предусматривать зонирование территории субъекта России для целей оптимизации деятельности по обращению с отходами. Определяет требования к деятельности регионального оператора и утверждается уполномоченным органом государственной власти субъекта Российской Федерации [3].

Заметим, что определяющим транспортную эффективность и основные расходы транспортных предприятий является схема движения потоков в регионе, закрепляемая в территориальной схеме. Однако методы, критерии, факторы оптимальности схем потоков территориальных схем в соответствующем федеральном законе не закреплены.

Сфера работы с отходами сильнее всего зависит от системы транспорта, то есть, наиболее чувствительна к организации эффективной транспортной работы [2]. Сегодня системы организации работы с твердыми коммунальными отходами подчинены федеральному закону N 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления" и с точки зрения логистики во всех регионах Российской Федерации построены по одному принципу [2,4].

Система работы с отходами состоит из следующих подсистем (схема на рисунке 1):

- подсистемы накопления или сбора (контейнерная площадка);
- подсистемы транспортировки (первое «плечо»);
- подсистемы перевалки/сортировки/переработки («перегруз»);
- подсистемы вторичной транспортировки «хвостов» (второе «плечо»);
- подсистемы утилизации/захоронения («полигон»).

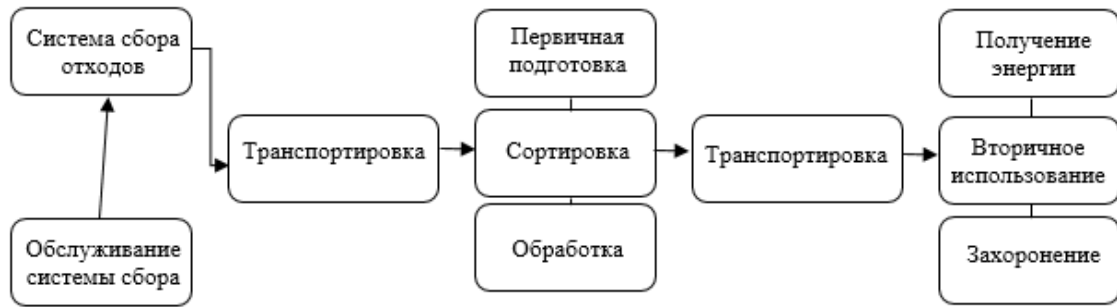


Рис. 1. Технологический процесс работы с отходами [5]

Принцип работы основан на взаимодействии вышеописанных систем. Как видно из рисунка 1, при работе с отходами устойчиво используется двухступенчатая схема (город Санкт-Петербург не исключение), где первая ступень — это транспортировка отходов до перегрузов или станций обработки отходов, а вторая – транспортировка отходов в составе автопоездов на полигоны. Уже неоднократно отмечались основные достоинства этой схемы, которые можно без труда формализовать, используя математические модели, используемые в логистике для определения условий оправданности склада (а в данном случае, пункта перегруза). В общем виде эффективность двухступенчатой модели вывоза описывается формулой 1:

$$\sum \frac{(P_k + T_k)}{N_c} + W_c + L_c \leq P_c + T_c, \quad (1)$$

где P_k – расходы на переработку партии ТБО через пункт перегруза;
 T_k – транспортные расходы доставки через пункт перегруза;
 N_c – количество малых отправок в одной отправке второй ступени;
 W_c – затраты склада;
 L_c – расходы на доставку ТКО к станции переработки;
 P_c – расходу на оплату водителей рейсов до полигона,
 T_c – транспортные расходы на прямую доставку ТКО на полигон минуя станцию перегруза.

В крупных городах Российской Федерации полигоны захоронения располагаются на значительных расстояниях от мест накопления отходов, что делает двухступенчатую модель вывоза безальтернативно эффективной.

Технологически процесс работы мусоровоза можно выразить в следующих базовых рабочих циклах (рисунок 2):

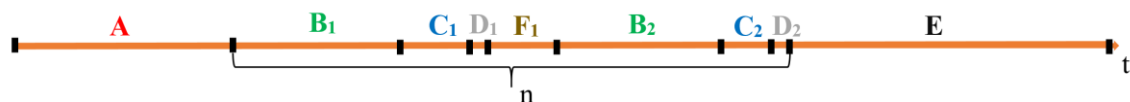


Рис. 2. Технологическая схема работы мусоровоза на первой ступени [5]

где А – движение от базы к месту сбора отходов;
 $B_{1,2}$ – работа в режиме сбора;
 $C_{1,2}$ – движение на станцию перегруза;
 $D_{1,2}$ – разгрузка;
 F_1 – движение со станции перегруза к месту сбора;
Е – движение на базу после последней разгрузки;
 t – время работы мусоровоза на линии;
 n – количество циклов разгрузки в рамках работы на линии [5].



Из рисунка 2 не трудно заметить, что, при расчете наиболее эффективной схемы потоков тяготения отходов к станции перегруза, влияние оказывают циклы движения на станцию перегруза и с нее к месту сбора (С и F), а также плечо возвращения на базу в конце выполнения маршрута (F). Эти циклы напрямую зависят от схемы тяготения потоков вывоза отходов [2].

Если отталкиваться от технологического процесса работы с отходами, то критерий выбора для маршрута должен иметь вид (формула 2):

$$T_{сов} = \sum_{n=1}^N T_c + T_F + T_E \rightarrow \min \quad (2)$$

где $T_{сов}$ - совокупные издержки, $\sum_{n=1}^N$ - количество разгрузок на маршруте, T_c - расходы при движении на станцию перегруза, T_F - расходы при движении со станции перегруза на территорию сбора, T_E - расходы при движении со станции перегруза на базу [2].

Для предприятия, имеющего М маршрутов модель общей оптимизации при выборе перегруза имеет вид (формула 3):

$$T_{сов} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N T_c + T_F + T_E \rightarrow \min \quad (3)$$

где $T_{сов}$ - совокупные издержки, $\sum_{m=1}^M$ - количество маршрутов, $\sum_{n=1}^N$ - количество разгрузок на маршруте, T_c - расходы при движении на станцию перегруза, T_F - расходы при движении со станции перегруза на территорию сбора, T_E - расходы при движении со станции перегруза на базу [2].

Однако, особо важную роль в общей эффективности системы начинают играть роль характеристики «перегрузов».

Проблема организации работы (возникновение простоев и очередей)

Эффективность работы и взаимодействия подсистем зависит от динамического влияния внешней среды, и многих внешних вероятностных параметров. Однако, можно с уверенностью сказать, что на сегодняшний день, управление данными подсистемами зачастую осуществляется в «ручном» режиме, основываясь на сиюминутной эффективности конкретной узловой точки системы. Связано это и с тем, что зачастую отдельные подсистемы находятся в управлении разных юридических лиц, и в целом общая макро-эффективность системы работы с отходами лица принимающие решения не заботит.

Исследуя организацию работы системы на микро и мезоскопическом уровне можно обнаружить существенный недостаток в организации. А именно: выбор транспорта, количества маршрутов, время выхода на линию, время прибытия на станцию перевалки или полигон определяются случайным образом, исходя из принципа «выполнения задачи вывоза отходов из А точек накопления, района Б на станцию перегруза С, с последующей транспортировкой «хвостов» на полигон Д». Иными словами, лица принимающие решения руководствуются только необходимостью осуществить вывоз отходов с мест накопления. *Очереди и простои* в узловых точках системы – наиболее явное следствие неправильной организации работы, ровно, как и привлечение капитала для строительства мощностей, являющихся *избыточными* в регионе. Такая организация работы приводит в существенным прямым и косвенным издержкам.

Лицо принимающее решение на сегодняшний день не может определить наиболее слабую узловую точку в общей системе и, как следствие, эффективно распределить инвестиции и капиталовложения, или же ответить себе на вопрос «насколько эффективно организован процесс работы с отходами в районе X?».

На сегодняшний день в системе работы с отходами в РФ не осуществляется организация



выпуска транспортных средства на линию, по определенному времени исходя из необходимости не создавать очередь в узловых точках. Ровно, как и транспортное средство осуществляющее сбор отходов, никогда не приезжает на станцию перегруза к определенному «обоснованному системой» времени. Сейчас работа идет по принципу наполняемости бункера, что зачастую не является оптимальным решением.

Применение теории систем массового обслуживания

Системное описание и определение основных характеристик «узловых» точек, необходимо чтобы повысить осознанность выбора транспорта, количества и качества маршрутов, времени выпуска на линию и прибытия в «узловую» точку на станции перегруза, работы с очередями в «узловых» точках, а также количественные характеристики параметров подсистем. Вышеописанное, а именно, установление зависимости между основными характеристиками системы обслуживания (число каналов обслуживания, характер входного потока заявок, которые необходимо обслужить, производительность отдельно взятого канала) с целью улучшения управления системами - является предметом теории массового обслуживания.

Таким образом, совокупность поставленных в рамках данной статьи проблем в области работы с отходами необходимо формализовать в рамках теории систем массового обслуживания.

Основные задачи теории массового обслуживания заключаются в следующем:

- построение математической модели системы массового обслуживания и расчет её основных характеристик;
- установление зависимости эффективности работы системы массового обслуживания от её организации;
- решение различных оптимизационных задач, связанных с функционированием системы массового обслуживания;
- выработка рекомендаций по рациональному построению системы массового обслуживания для обеспечения высокой эффективности ее функционирования. [6]

Все задачи теории массового обслуживания носят оптимизационный характер и в конечном итоге направлены на определение такого варианта работы системы, при котором будет обеспечен минимум суммарных затрат от простоев каналов обслуживания, потерь времени и ресурсов [6].

В общем виде процесс транспортной работы с отходами может быть формализован в категориях системы массового обслуживания следующим образом (рисунок 3).

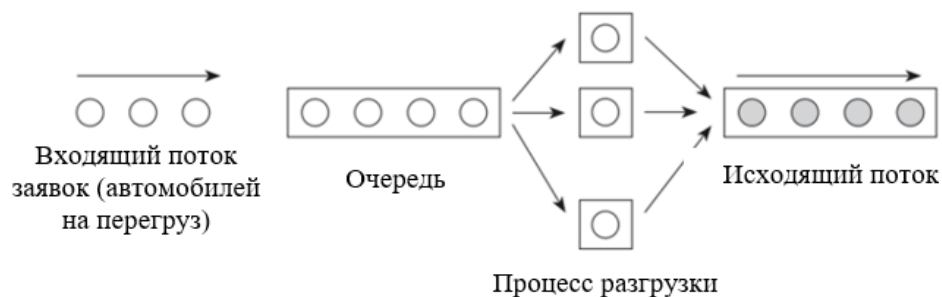


Рис. 3. Общий вид системы массового обслуживания

Классификация систем массового обслуживания очень многообразна (рисунок 4). В первую очередь необходимо формализовать тип СМО приёмный к описанию процессов в системе работы с ТКО.

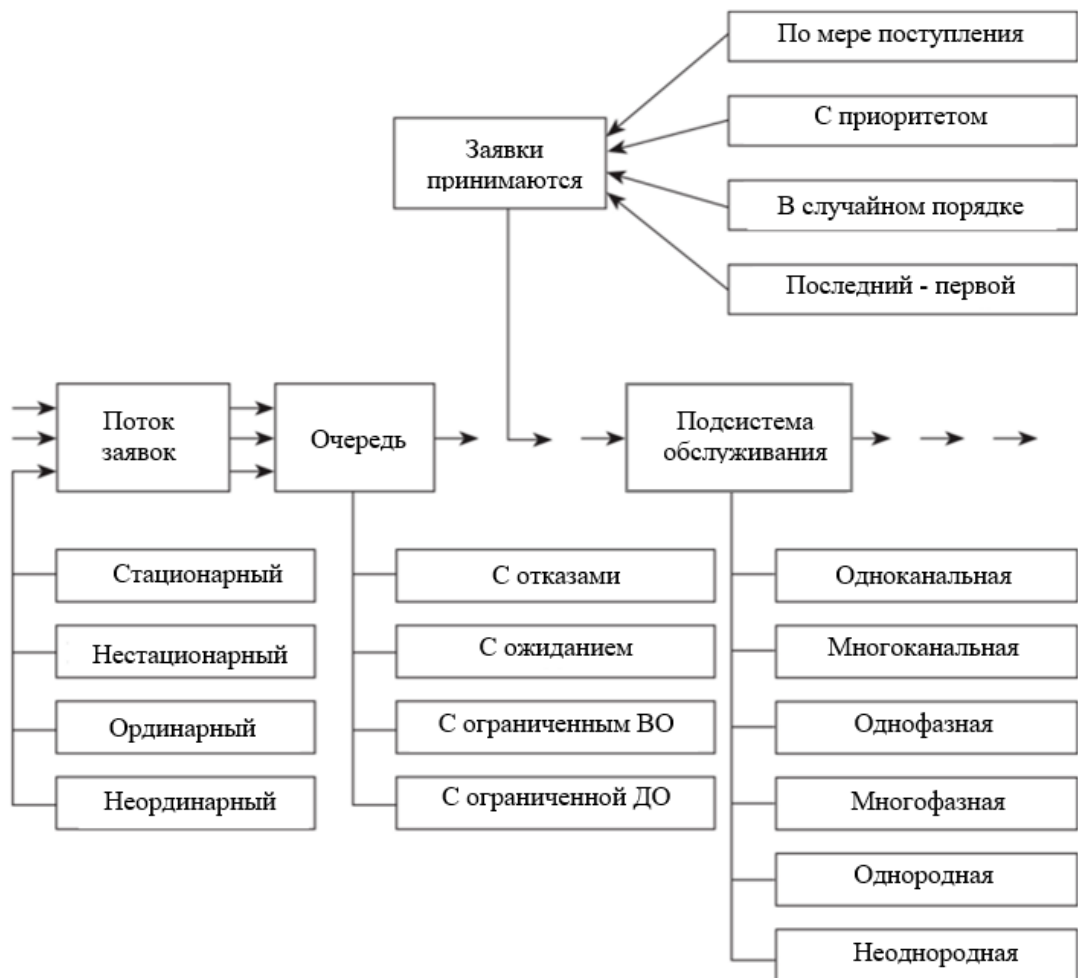


Рис. 4. Классификация систем массового обслуживания

Описание системы работы с ТКО в рамках теории массового обслуживания

Основываясь на практических данных и специфике системы работы с отходами необходимо определить в рамках задачи на микроуровне, то есть в рамках одного перегруза в виде СМО – система описывается как многоканальная (одновременно разгружаться могут несколько автомобилей) однофазная, однородная система с ограниченным временем ожидания (как правило очень большим) с нестационарным потоком заявок, принимающимися по мере поступления.

В рамках описания системы перегрузов внутри района или участка территориальной схемы на мезоскопическом уровне, СМО представляется в виде многоканальной, однофазной, однородной системы (одновременно существует несколько альтернативных перегрузов для автомобилей) с ограниченный временем ожидания, с нестационарным потоком заявок, принимающимися по мере поступления.

На макроуровне описания системы территориальную схему движения потоков ТКО в рамках региона рациональнее всего описать как многоканальную, многофазную (поток заявок с перегруза идет на полигон с некоторой трансформацией) систему массового обслуживания с ограниченным временем ожидания, с нестационарным потоком заявок, обслуживающийся по мере их поступления.

Важно отметить что система на любом уровне может приобретать свойство неоднородности если вводить критерий различных типов отходов (бытовых, крупногабаритных, отдельно собранных) или разных типов транспорта (задняя загрузка, мультилифт, скиплоудер). Однако необходимость введения различных типов заявок обуславливается поставленными задачами и не несет принципиальной необходимости.



Заключение

Одной из серьезных проблем в организации системы работы с отходами, является ее не системность. Очереди и простои в «узловых» точках системы – наиболее явное негативное следствие, равно, как и привлечение капитала для строительства мощностей, являющихся избыточными в регионе. Все вышеописанное приводит к существенным прямым и косвенным издержкам.

Установление зависимости между основными характеристиками системы обслуживания (число каналов обслуживания, характер входного потока заявок, которые необходимо обслужить, производительность отдельно взятого канала) с целью улучшения управления системами - является предметом теории массового обслуживания.

Проблема, поставленная в рамках данного исследования в области работы с отходами, была формализована в рамках теории систем массового обслуживания. Исследование основных параметров «узловых» точек в рамках СМО, позволит использовать имеющиеся исходные данные у лиц принятия решения, для при решении задач оптимизации.

Важнейшую задачу оптимизации логистики системы работы с ТКО, можно разделить на ряд независимых оптимизационных задач, решение которых позволит описать систему в виде математических моделей и осознанно подходить к организации потоков вывоза и поиска оптимального решения. Задачи, связанные с оптимизацией вывоза:

1. Оптимизация циклов сбора отходов – организация маршрута следования между объектами накопления (деление участка на маршруты, выбор системы оптимального сбора).
2. Оптимизация расположения баз перевозчиков относительно мест сбора – задача снижения издержек на движение транспорта от базы до мест сбора отходов.
3. Оптимизация потоков вывоза с использованием теории СМО – рассмотрение системы на макро, мезо или микроскопическом уровне через теорию систем массового обслуживания.
4. Оптимизация выбора станции перегруза – можно формализовать в виде задачи линейного программирования, то есть представить, как транспортная задача с промежуточными пунктами.
5. Оптимизация выбора полигона захоронения – можно формализовать в виде задачи линейного программирования, то есть представить, как транспортная задача с промежуточными пунктами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рубинов В. В. Оценка динамики роста отходов в Санкт-Петербурге // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №3(25), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП. – 2020 – с. 3-8. РИНЦ. DOI: 10.31799/2007-5687-2020-3-3-8.
2. Рубинов В. В., Фетисов В. А. Разработка модели оптимизации потоков ТКО на уровне маршрутов // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №4(30), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2021 – с. 68-75. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-68-75.
3. Территориальные схемы обращения с отходами, основные положения [Электронный ресурс]. – URL: <http://gkhrazvitie.ru/recycling/> (дата обращения 24.10.2022).
4. Федеральный закон РФ № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», принят государственной думой 22.05.1998 г. Постановлением № 2491-П ГД, подписан президентом РФ 24.06.1998 г. с изменениями по состоянию на 18.12.2006. [Электронный ресурс] – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения 07.11.2021).
5. Rubinov V. V. Problems of a Modern Approach to the Technological Process of Waste Management Conference Proceedings: 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF) // IEEE. 2021. Copyright.



P. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470744.

6. Солнышкина И. В. Теория систем массового обслуживания: учеб. пособие / И. В. Солнышкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 76 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Рубинов Владислав Валерьевич –

Аспирант, инженер кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: vvr1071995@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rubinov Vladislav Valerievich –

Postgraduate student, Engineer of the Department of System Analysis and Logistics
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: vvr1071995@mail.ru