

8. Stoborod, B.S. Issledovanie sostoyaniya umstvennoi rabotosposobnosti i zdorov'ya studentov po postoyannym potentsialam kozhi golovy i ruk [A study of the state mental health and health students at the constant potential of the skin of the head and hands] / B.S. Stoborod, V.P. Bashmakov, N.K. Dvoryashina, V.A. Cherepov // *Rabotosposobnost' i funktsional'noe sostoyanie organizma studentov: sbornik nauchnykh trudov* [The health and functional state of organism of students: collection of scientific papers]; Leningr. sanit.-gigien. med. in-t ; pod red. O. P. Dobromyslova. – Leningrad: Publ. LSGMI, 1987. – Pp. 66-70.

9. Sudakov, K.V. Teoriya funktsional'nykh sistem [The theory of functional systems] / K.V. Sudakov. – Moscow: Publ. Med. muzei, 1996. – 95 p.

10. Surzhikova, S.E. Ispol'zovanie gibridnykh neirosetevykh modelei dlya mnogoagentnykh sistem klassifikatsii v geterogennom prostranstve informativnykh priznakov [The use of hybrid neural network models for multi-agent classification systems in a heterogeneous space of informative features] / S.E. Surzhikova, S.A. Filist, V.V. Zhilin, A.G. Kurochkin // *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian journal: control and high technologies]. – 2015. – No. 3. – Pp. 85-95. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(30\)/150-161.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(30)/150-161.pdf))

11. Surzhikova, S.E. Issledovanie provodimosti biomaterialov v bioaktivnykh tochках pri tsiklicheskiх vozdeistviyakh tokami razlichnoi polyarnosti [A study of the conductivity of biomaterials to bioactive points under cyclic impact with currents of different polarity] / S.E. Surzhikova, Yu.B. Mukhataev, O.V. Shatalova i dr. // *Biomeditsinskaya radioelektronika* [Biomedical radioelectronics]. – 2016. – No. 9. – Pp. 32-37.

12. Filist, S.A. Strukturno-funktsional'naya model' meta-analiza mediko-ekologicheskikh dannykh [Structural-functional model of the meta-analysis of medico-ecological data] / S.A. Filist, V.V. Uvarova, A.N. Shutkin // *Voprosy radioelektroniki. Seriya «Obshchetekhnicheskaya»* [Questions of radioelectronics. Series: "General technical"]. – 2015. – No. 7. – Pp. 102-110.

13. Shutkin, A.N. Strukturno-funktsional'naya model' dlya monitoring vliyaniya upravlyayushchikh vozdeistvii na funktsional'noe sostoyanie samoorganizuyushchikhsya sistem [Structural-functional model for monitoring the impact of control actions on the functional state of self-organizing systems] / A.N. Shutkin, P.S. Kudryavtsev, V.V. Protasova [i dr.] // *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal* [Caspian journal: control and high technologies]. – 2015. – No. 2 (30). – Pp.105-119. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2\(30\)/150-161.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/2(30)/150-161.pdf)).

#### РЕДАКЦИОННЫЙ КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ

Работа посвящена актуальной теме, т.к. подготовка специалистов экстремальных профессий обходится достаточно дорого, а цена допускаемых ими ошибок может быть еще выше. Поэтому рассматриваемая в статье проблематика важна не только при профотборе кандидатов на должности, но и оценках характеристик уже работающего персонала (эти характеристики могут со временем меняться, в т.ч. и под воздействием каких-то заболеваний, негативных внешних воздействий и пр.). Использование математического аппарата и информационных технологий (в т.ч. нейросетевых структур) отражено в статье достаточно подробно. В работе используются в основном известные модели, но применительно к специфической предметной области.

Однако по статье целесообразно сделать некоторые замечания. Название статьи смотрится как слишком общее. Фактическое содержание статьи существенно уже и оно становится понятным лишь из аннотации к работе. В целом работа носит преимущественно теоретический характер. Хотя в ней и приводятся результаты некоторых экспериментов, но этот материал смотрится как вспомогательный. При этом характеристика конкретных «объектов экспериментов» фактически не приведена.

УДК 004.023

#### ВЫБОР МАРШРУТНОЙ СЕТИ АУДИТА ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ТОРГОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

**Милихин Михаил Михайлович**, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 40, аспирант, ORCID 0000-0003-2751-2041, e-mail: milikhin@gmail.com

**Гриценко Юрий Борисович**, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 40, кандидат технических наук, доцент, ORCID 0000-0002-6454-0992, e-mail: ubg@tusur.ru

**Шурыгин Юрий Алексеевич**, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 40, доктор технических наук, профессор, e-mail: aem@tusur.ru

В статье рассмотрены проблемы, с которыми сталкиваются организации, занимающиеся обследованием подконтрольной сети торговых и промышленных объектов. Исследованы вопросы оптимизации маршрута следования аудиторов при организации полевых работ с использованием множественной задачи коммивояжера (МЗКВ) в качестве математической модели. Проведен анализ существующих публикаций, на основании которого выполнена классификация возможных формулировок МЗКВ. Проанализированы существующие подходы и методы решения МЗКВ для различных вариантов постановок задач. На основе анализа сделан вывод о целесообразности разработки дополнительных методов. Предложена оригинальная математическая модель, учитывающая выявленные особенно-

сти предметной области. Эта модель предназначена для оптимизации затрат на проведение аудиторами выездных работ за счет выбора оптимальной маршрутной сети следования работников. Предложен алгоритм решения этой задачи для нескольких аудиторов, начинающих движение из разных точек отправления, с учетом прогнозируемой дорожной ситуации. Для апробации разработанной методики реализован программный продукт (ПП), использующий метод имитации отжига в качестве эвристического алгоритма оптимизации. Этот ПП интегрирован в разрабатываемую авторами веб-ориентированную геоинформационную систему WGS3. Проведена апробация методики с использованием ПП на примере организации аудита розничных торговых точек продуктовых магазинов г. Томска. Сделаны выводы о пригодности предложенных модели и алгоритма для решения поставленных в работе МЗКВ.

**Ключевые слова:** аудит розничных торговых точек; мониторинг промышленных объектов, множественная задача коммивояжера; оптимизация маршрута, вычислительные алгоритмы, метод имитации отжига; преобразование задачи коммивояжера

### SEARCHING FOR OPTIMAL ROUTE NETWORK FOR AUDIT OF COMMERCIAL AND INDUSTRIAL FACILITIES

**Milikhin Mikhail M.**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), 40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, post-graduate student, ORCID 0000-0003-2751-2041, e-mail: milikhin@gmail.com

**Gritsenko Yuriy B.**, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), 40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID 0000-0002-6454-0992, e-mail: ubg@tusur.ru

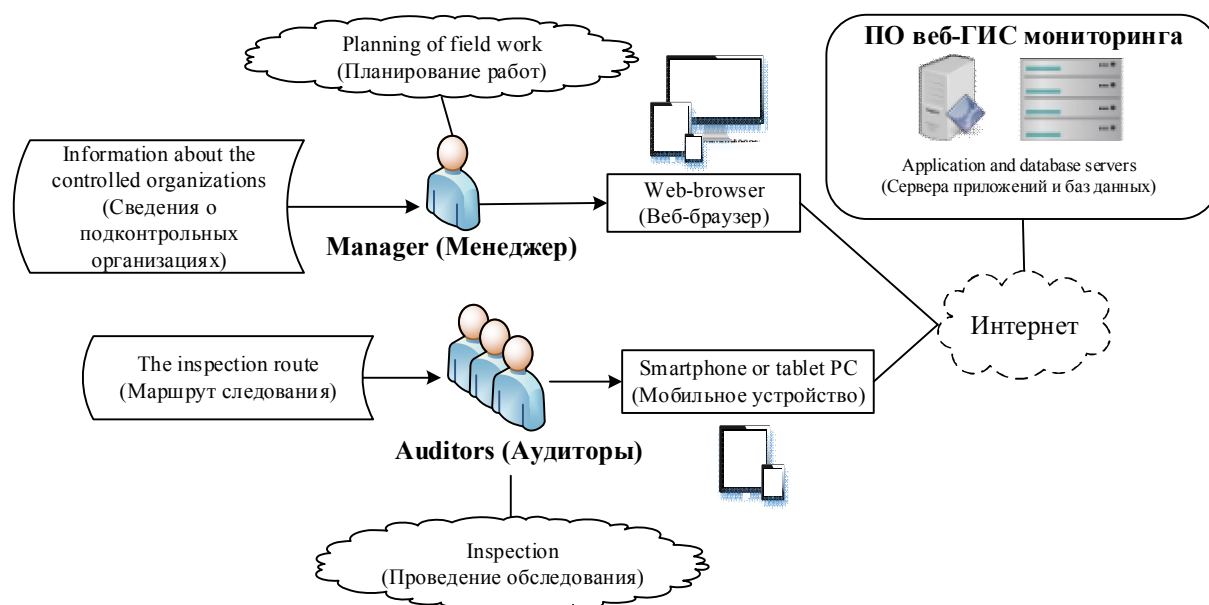
**Shurygin Yuriy A.**, T61omsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR), 40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: aem@tusur.ru

The paper contains an analysis of commercial and industrial facilities' problems within the task of audit of organizations' spatial objects. The problem of route optimization within the organization of field work during the monitoring is studied using the multiple traveling salesman problem (MTSP) as a mathematical model. Literature review was held in order to classify existing MTSP formulations, and analyze available methods and algorithms for solving MTSP's. Authors than conclude that it is impossible to solve the given problem using existing methods and the new approach is needed. The original mathematic model of the monitoring process is proposed in order to solve revealed problems. The model is intended to optimize searching for optimal route network for auditors. The original algorithm for solving the given problem with multiple departure points is proposed taking into account the forecasted traffic situation. To approbate the developed method, a software product was developed with the use of the annealing simulation as a heuristic optimization algorithm. The software was integrated into WGS3 geoinformation system and tested on the task of monitoring retail outlets of Tomsk (Russian Federation). Conclusions are made about the suitability of the proposed model and for solving the problems revealed in the work.

**Keywords:** monitoring of retail outlets, monitoring of industrial objects, multiple travelling salesman problem, route optimization, computational algorithms, simulated annealing, transformation of travelling salesman problem

#### Графическая аннотация (Graphical annotation):



Задачи организации аудита сети территориально распределенных объектов находят широкое применение как в рамках отдельно взятого промышленного предприятия, так и на городском или региональном уровне – в т.ч. для предприятий в сфере оказания услуг. В зависимости от вида деятельности предприятия потребность в проведении выездных работ может быть обусловлена действующими нормативно-правовыми актами или техническими регламентами. В случае решения маркетинговых задач контрольные сроки проведения аудита могут быть выбраны лицом, принимающим решения, с учетом целей конкретного исследования, используемых в работе моделей и методик [8], а также имеющихся ресурсных ограничений.

Так, согласно Федеральному закону Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [17] объекты гражданского и промышленного назначения должны быть оснащены системами охранно-пожарной сигнализации и пожаротушения. Такие системы требуют проведения периодического своевременного технического обслуживания в соответствии с постановлением правительства Российской Федерации от 25 апреля 2012 года №390 «О противопожарном режиме» [14]. Кроме того, сроки перезарядки и проверки универсальных средств первичного пожаротушения предусмотрены сводом правил СП 9.13130.9009, разработанным в соответствии со статьями 43 и 60 Федерального закона №123-ФЗ [17].

Необходимость периодического обследования промышленных объектов может быть также обусловлена требованиями промышленной безопасности. Согласно [9] повышенным риском возникновения аварийных ситуаций характеризуются здания и сооружения, не подвергавшиеся обследованию в отношении технического состояния и экспертизе промышленной безопасности; здания, обследование которых проходит с несоблюдением установленных сроков очередной экспертизы промышленной безопасности.

Необходимость проведения периодического аудита подконтрольных объектов обуславливает введение понятия мониторинга. Под мониторингом принято понимать функцию постоянного наблюдения за каким-либо объектом, процессом или явлением с целью выявления его состояния и тенденций изменения этого состояния [9].

Отметим, однако, что организация аудита подконтрольных объектов в рамках мониторинга является нетривиальной задачей, требующей детального обоснования эффективности и целесообразности проводимых мероприятий. Отдельной проработки требуют вопросы планирования графика работы аудиторов и периодичности необходимых проверок [2,22,23]. Кроме того, проведение аудита требует оптимизации разделенных выполняемых задач между отдельными полевыми работниками; рациональной организации их следования (перемещений) между объектами мониторинга в течение рабочего дня. Эти вопросы в существующей литературе рассмотрены недостаточно полно, в т.ч. и с точки зрения оптимизации маршрутов перемещения полевых работников.

Поэтому целью работы является повышение эффективности мониторинга территориально распределенных торговых и/или промышленных объектов на уровне города за счет выбора оптимальной маршрутной сети следования аудиторов с учетом реалий перемещений в условиях городской среды.

#### **Общая характеристика процессов мониторинга торговых и промышленных объектов.**

В современной литературе представлен ряд исследований, посвященных вопросам мониторинга торговых и промышленных объектов – сторонними организациями или собственными аудиторами.

Одним из направлений изучения территориально распределенных объектов является геоинформационный мониторинг [24]. Как вид мониторинга он предполагает контроль состояния объекта наблюдения с учетом пространственных отношений в рамках среды [7]. Особое внимание в таких исследованиях уделяется вопросам интеграции первичных пространственных данных, полученных из различных источников, таких как картографические подложки, топологические карты, тематические векторные и растровые слои, а также данные дистанционного зондирования Земли, и их последующего анализа [4, 5, 16]. Вопросы геомониторинга подробно рассмотрены в работах В. Я. Цветкова, С. А. Куджа, В. П. Савиных, В. Е. Ольховатенко, А.И. Павлова [6, 10, 11, 14]. В то же время, вопросам планирования и оптимизации проведения полевых работ по сбору первичных данных при мониторинге, как правило, не уделяется должного внимания в работах по геомониторингу. Однако они находят отражение в работах, посвященных вопросам организации аудита совокупности торговых объектов.

Так, Чуанг (Chuang), Олива (Oliva) и Лиу (Liu) в своей работе [24] показали эффективность использования мониторинга точек национальной торговой сети для решения маркетинговых задач и обеспечения окупаемости затрат на проведение аудита. В то же время частота необходимых проверок состояния торговых объектов существенно снижается после окончания переходного периода, в течение которого аудиторы исправляют ошибки, возникшие до внедрения системы аудита. В целом можно считать что указанный выше мониторинг является составной частью «системы менеджмента качества» деятельности организаций.

Хьюгс (Hughes) в своей работе [30] сформулировал Марковский процесс принятия решений для определения оптимальной периодичности мониторинга с целью повышения эффективности аудита. Морей (Morey) и Диттман (Dittman) в дальнейшем предложили модель расчета оптимальной периодичности мониторинга для достижения заданного уровня точности процессов отслеживания сведений о состоянии

подконтрольных объектов [36]. Сандо (Sandoh) и Шинамото (Shinamoto) разработали стохастическую модель нахождения оптимальной частоты проведения инвентаризации товаров в супермаркете [43].

Кроме того, в литературе подробно представлены и вопросы мониторинга состояния промышленных объектов. Так, Мусаев В.К. и Шиянов М.И. указывают на необходимость комплексного мониторинга технического состояния строительных объектов с использованием баз данных, позволяющих в режиме реального времени получать сведения, необходимые для обеспечения промышленной безопасности. При этом экономический ущерб от аварий на промышленных предприятиях в случае отсутствия мониторинга может составлять порядка 4–6 % внутреннего валового продукта [9]. Поэтому затраты на предотвращение таких аварий за счет мониторинга могут быть обоснованы через величины «предотвращенного ущерба».

Таким образом, анализ научной литературы позволяет сделать вывод о том, что современные исследования концентрируются, в основном, на теоретических аспектах мониторинга. При этом остаются открытыми вопросы непосредственной организации полевых работ и оптимизации процесса сбора и обработки первичных данных результатов мониторинга.

Наличие пространственной составляющей, как одного из основных компонентов описания процессов проведения и результатов мониторинга, оказывает существенное влияние на процессы организации полевых работ и последующего анализа собранных данных. Это обуславливает целесообразность рассмотрения возможностей использования геоинформационных технологий для решения выявленных проблем.

На основании проведенного анализа научной литературы был сделан вывод, что структура процесса мониторинга территориально распределенных торговых и промышленных объектов включает в себя четыре основных этапа.

1. Определение постановки задач мониторинга.
2. Выбор совокупности объектов мониторинга.
3. Формирование индивидуальных заданий для аудиторов, включая маршруты перемещений.
4. Практическое проведение выездных работ аудиторами.

Определение постановки задач мониторинга предполагает формулирование задач (с учетом принятой формализации); установление формы отчетности, которая в дальнейшем будет использована полевыми работниками при проведении выездных работ.

Выбор совокупности объектов мониторинга предполагает отбор среди подконтрольных организаций в пределах целевого региона только тех объектов, которые необходимо посетить при проведении работ за один выезд.

Результатом этапа формирования индивидуальных заданий для аудиторов является разбиение объектов мониторинга на кластеры, соответствующие отдельным полевым работникам или бригадам. При этом в рамках каждого кластера необходимо выбрать оптимальное время и маршрут следования работников с учетом особенностей дорожной ситуации и графика работы клиентских организаций (которые должны быть обследованы).

Необходимость ведения перечня основной информации о подконтрольных объектах (включающего сведения об их расположении, графике работы, а также данные о результатах аудита) обуславливает целесообразность использования базы данных объектов мониторинга. Основой для формирования такой базы данных при организации сервисных работ являются результаты выездных работ, полученные от технического персонала, а также данные о клиентских предприятиях, полученные из открытых источников. Организация процесса мониторинга предполагает постановку заданий аудитора на обход (объезд) подконтрольных объектов. При этом, в отдельных этапах мониторинга, как правило, одновременно участвуют несколько аудиторов. При таких условиях, хотя бы один аудитор должен посетить каждый из выбранных объектов мониторинга. Постановка задачи аудитора в таком случае соответствует задаче коммивояжера (ЗКВ). Кроме того, некоторые объекты должны посетить два или более аудиторов, причем, обычно, в разное время.

Считается, что ЗКВ является одной из наиболее трудных задач целочисленного линейного программирования. Ее содержательную формулировку можно сформулировать как задачу отыскания кратчайшего (наиболее выгодного) замкнутого пути обхода заданного множества точек (населенных пунктов) при отсутствии петель в маршруте [39]. Нахождение оптимального маршрута в ЗКВ относится к классу NP-полных задач [39].

Задача коммивояжера с несколькими агентами (множественная задача коммивояжера, МЗКВ) представляет собой обобщение ЗКВ и сводится к определению множества маршрутов  $m$  коммивояжеров, каждый из которых начинает и заканчивает свое движение в заданной точке отправления (в общем случае эти точки для разных коммивояжеров могут быть разные).

**Постановка МЗКВ.** Современные исследователи отмечают, что, несмотря на возможность широкого применения постановки МЗКВ при решении повседневных задач, этому классу задач уделяется меньше внимания, чем классической ЗКВ с одним коммивояжером [19]. Основной упор при исследовании МЗКВ делается на решение отдельно взятых постановок задач для выбранной предметной области с учетом специфических для нее ограничений и дополнительных условий.

На практике встречаются различные варианты постановки задачи [19, 20, 29] (рис. 1). При этом каждая конкретная постановка МЗКВ заключается в комбинировании различных вариантов дополнительных ограничений и выборе определенного критерия оптимизации. Варианты МЗКВ можно классифицировать по количеству исходных и конечных вершин; количеству коммивояжеров; наличию или отсутствию фиксированных затрат на использование коммивояжера в решении задачи; наличию дополнительных ограничений в виде временных окон; максимальному или минимальному количеству вершин, которые может посетить один агент (коммивояжер); максимальному расстоянию, которое может преодолеть агент (в общем случае эти расстояния для агентов разные) и других специальных ограничений. Кроме того, постановки МЗКВ могут быть «закрытые» (с обязательным возвращением агента в начальную точку маршрута) и открытые (маршрут заканчивается на последнем посещенном объекте).

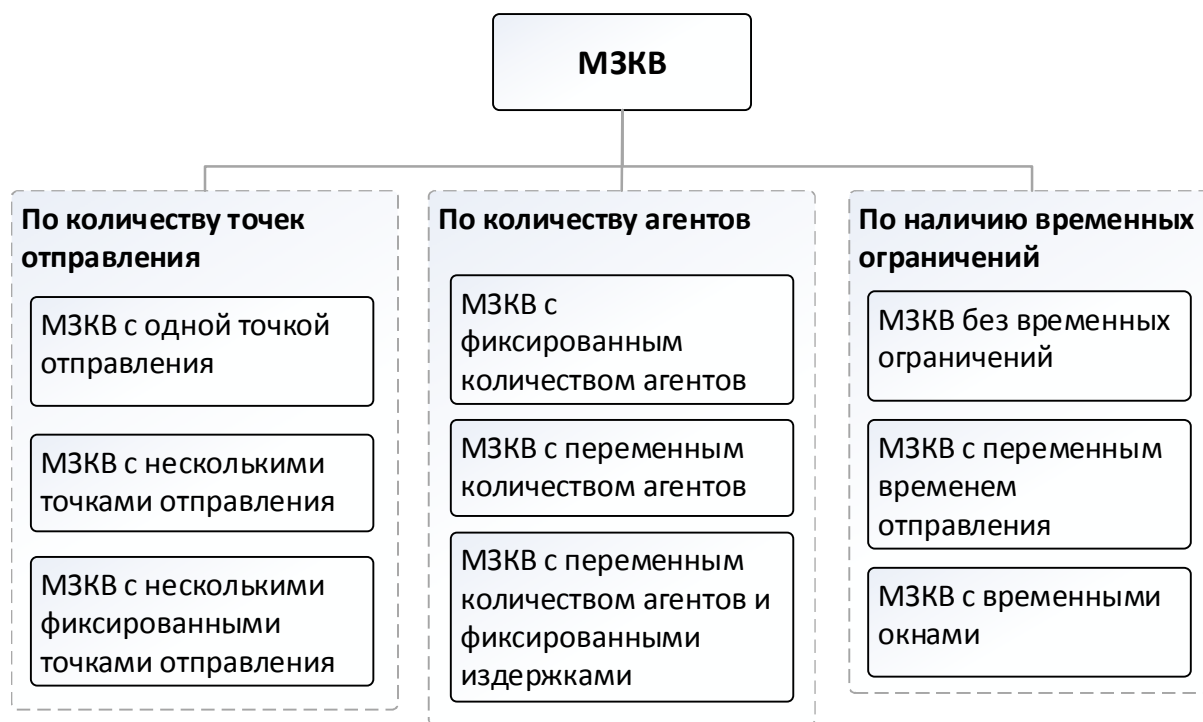


Рисунок 1 – Классификация постановок МЗКВ

Рассмотрим некоторые возможные постановки МЗКВ более подробно.

*Классификация по количеству точек отправления* предполагает, что в зависимости от постановки задачи все коммивояжеры должны начинать и заканчивать путь строго в одной точке отправления (МЗКВ с общей точкой отправления) или каждый коммивояжер может иметь свои начальную и конечную точку (МЗКВ с несколькими точками отправления). В свою очередь, МЗКВ с несколькими точками отправления может накладывать дополнительные ограничения на конечные точки маршрутов каждого из коммивояжеров, определяющие необходимость возвращения агентов строго в исходную точку или же в любую из точек отправления (на усмотрение конкретного коммивояжера).

*Классификация по количеству коммивояжеров* отражает задачи с фиксированным или переменным (заранее не определенным) количеством коммивояжеров – в этом случае количество коммивояжеров определяется в процессе решения задачи в рамках оптимизации значения целевой функции. В постановке задачи с переменным количеством агентов также выделяют вариант с фиксированными издержками на использование отдельного агента в решении задачи.

*Классификация по наличию временных ограничений* определяет класс МЗКВ с временными окнами. Последние указывают на необходимость посещения некоторых точек аудита в строго отведенные промежутки времени.

Перечисленные постановки задач обычно рассматриваются исходя из «четких условий» для движения коммивояжеров (агентов) и проведения ими работ на объектах.

МЗКВ определяется на графе  $G = (V, A)$ , где  $V = \{v_i\}$  – множество из  $n$  вершин, а  $A = \{a_{i,j}\}$  – множество дуг (рис. 2).

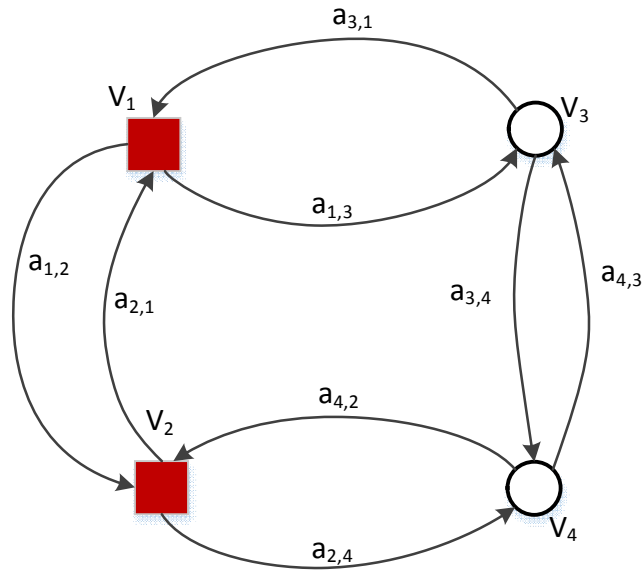


Рисунок 2 – Пример МЗКВ для двух коммивояжеров и двух пунктов назначения (вершины графа  $V_1$  и  $V_2$  соответствуют точкам отправления коммивояжеров,  $V_3$  и  $V_4$  – пунктам назначения)

Для описания математической постановки МЗКВ введем несколько определений. Пусть  $C = (c_{i,j})$  – матрица весов для дуг  $A$ . В таком случае симметричной МЗКВ соответствует симметричная матрица  $C$ , (мы будем считать ее симметричной, если для любых  $i, j < n$  выполняется условие  $c_{i,j} = c_{j,i}$ ). Ассиметричной МЗКВ соответствует ассиметричная матрица  $C$ .

МЗКВ называется метрической, если для матрицы весов выполняется условие неравенства треугольника:  $c_{i,j} + c_{j,k} \geq c_{i,k}$ .

Определим бинарную переменную  $x_{i,j}$  такую, что

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если дуга } a_{i,j} \text{ присутствует в решении} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Теперь общую схему формулировки МЗКВ как задачи целочисленного программирования можно представить следующим образом.

Задача – минимизировать  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{i,j} x_{i,j}$  при соблюдении ряда условий:

- $\sum_{j=2}^n x_{1,j} = m$  – ограничение, определяющее участие каждого из  $m$  коммивояжеров в решении;
- $\sum_{j=2}^n x_{j,1} = m$  – ограничение, определяющее, что каждый из  $m$  коммивояжеров должен вернуться в точку отправления;

не содержащих точку отправления;

- $\sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1, j = 2, \dots, n$ ;  $\sum_{i=1}^n x_{i,j} = 1, j = 2, \dots, n$  – запрет на повторное прохождение по одним и тем же дугам в итоговом решении;

не содержащих точку отправления;

- $\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{i,j} \geq 1, \forall S \subseteq V \setminus \{1\}, S \neq \emptyset$  – ограничения на исключение из решения подциклов,

не содержащих точку отправления.

Отметим, что целевая функция и список ограничений могут варьироваться в зависимости от типа конкретной постановки МЗКВ. Так, например, МЗКВ с фиксированными издержками [32] соответст-

вует целевая функция  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{i,j} x_{i,j} + f_m$ , где  $f_m$  – суммарная фиксированная стоимость использования  $m$  агентов в решении.

Использование постановки МЗКВ потенциально может иметь более широкую область применения по сравнению с классической ЗКВ за счет возможности использования нескольких агентов. Анализ научной литературы показывает, что МКЗВ нашла практическое применение, в частности, в следующих сферах.

- Планирование процесса печати периодических изданий [27] и их предпечатной подготовки [47].
- Планирование расписания работы технической бригады [32].
- Планирование расписания работы группы фотографов [50].
- Составление расписания интервьюирования [26].
- Балансировка рабочей нагрузки экипажей скорой помощи [38].
- Составление расписания движения сотрудников службы безопасности [21].
- Задача составления расписания для движения школьного автобуса [18].
- Планирование работы причальных кранов [31].
- Планирование миссии автономных мобильных роботов [40].
- Моделирование процесса горячего проката металла [45].
- Проектирование исследовательской спутниковой системы [41].
- Статистический анализ данных, включая задачи упорядочения и кластеризации объектов –

например, упорядочение генов или кластеризации белков [42].

Таким образом, наиболее часто МЗКВ используется для решения конкретных проблем в задачах поиска оптимального пути и планирования расписаний с учетом ограничений, заданных выбранной предметной областью.

**Постановка задачи выбора оптимальной маршрутной сети мониторинга торговых и промышленных объектов.** Математическую постановку задачи выбора оптимальной маршрутной сети мониторинга можно представить следующим образом. Введем такие обозначения:

- $V = \{V_1, V_2, \dots, V_{m+n}\}$  – множество вершин, соответствующих  $m$  точкам отправления коммивояжеров  $\{V_1, \dots, V_m\}$  и  $n$  торговым или промышленным объектам  $\{V_{m+1}, \dots, V_{m+n}\}$ , которые необходимо посетить;

- $E = V \times V$  – множество ребер;

- $T_i = \{V_{i_1}, V_{i_2}, \dots, V_{i_{l_i}}\}$  – путь  $i$ -го агента, где  $l_i$  – количество точек, которые должен посетить

$i$ -й аудитор;

- Весовая функция

$$C(a, b, t(T, s, a)) \tag{1}$$

определяет стоимость пути аудитора из вершины  $a$  в вершину  $b$ , а  $t(T, s, a)$  – функция определения времени отправления аудитора из точки «а» при известном маршруте следования аудитора  $T$  и времени отправления аудитора по маршруту  $s$ ;

- $C(T_i, s) = \sum_{k=1}^{l_i-1} C(V_{i_k}, V_{i_{k+1}}, t(T_i, s))$  – стоимость пути  $i$ -го аудитора при отправлении на вы-

полнение задания в момент времени  $s$ .

В задаче необходимо минимизировать  $\sum_{i=1}^m C(T_i, s)$  и выбрать оптимальный момент времени  $s$

для выполнения обхода.

Предложенная постановка задачи представляет собой частный случай обобщенной асимметричной метрической задачи коммивояжера с переменными весами и временем отправления, несколькими коммивояжерами и несколькими точками отправления. Такая постановка отличается от известных следующим: наличием весовой функции, зависящей от времени следования между точками; нескольких коммивояжеров, начинающих движение из разных точек в разное время.

**Алгоритмы решения МЗКВ.** Эвристический метод решения МЗКВ был впервые предложен Р. Расселом (R. Russell) [28] для симметричной задачи с одной точкой отправления. Этот алгоритм представлял собой расширенную версию эвристики Лина-Кернигана. В 1990 г. Д. Фогель (D. Fogel) предложил подход к решению МЗКВ с использованием эволюционного алгоритма и параллельных вычислений, позволявший находить близкие к оптимальному решения для задач с размерностью до 50 точек для задачи с двумя коммивояжерами [25].

Е. Уахолдер (E. Wacholder) [48] расширил модель искусственной нейронной сети Хопфилда-Танка для МЗКВ. Однако предложенная им модель не нашла широкого применения в силу трудности нахождения даже приблизительно-оптимальных решений. Ч. Су (C. Hsu) и др. [29] в 1991 г. предложили новый подход к решению МЗКВ с использованием нейронных сетей и показали его *большую* эффективность по сравнению с алгоритмом Уахолдера. С. Голдштейн (S. Goldstein) и А. Вахутинский (A. Vakhutinsky) [47] представили метод решения МЗКВ с использованием самоорганизующейся нейронной сети. А. Модарес (Modares) и С. Сомхом (Somhom) [35] разработали алгоритм, основанный на самоорганизующейся нейронной сети для минимаксной задачи МЗКВ, минимизирующей стоимость самого дорогого маршрута.

Широкое отражение в научных работах нашло применение генетических алгоритмов (ГА) для решения МЗКВ [45, 29]. Л. Танг (L. Tang) [45] использовал генетический алгоритм при решении МЗКВ с одной точкой отправления. Этот алгоритм фактически представлял собой специальную модификацию для МЗКВ алгоритма, предназначенного для моделирования процесса горячего проката металла. Ж. Ю (Z. Yu) [49] описал применение ГА для решения задачи поиска оптимального пути автономными мобильными роботами в рамках задачи МЗКВ с одной точкой отправления, а Л. Риан (L. Ryan) [40] предложил эвристическое решение схожей задачи управления беспилотными летательными аппаратами с учетом временных ограничений (временных окон).

Анализ литературы показывает, что, несмотря на наличие большого количества работ по теме МЗКВ, решение поставленной задачи с непосредственным использованием представленных в литературе алгоритмов не представляется возможным. Причина – отсутствие возможности учесть одновременно все дополнительные ограничения предметной области в рамках одного алгоритма.

Для достижения поставленных в настоящей работе задач авторы предлагают использовать оригинальный алгоритм. В его основу положена идея преобразования МЗКВ к ЗКВ с одним коммивояжером за счет ввода дополнительных вершин и ограничений. Возможность использования такого преобразования с сохранением оптимального решения подробно описана в работе П. Оберлина, С. Ратинама и С. Дарбы (P. Oberlin, S. Rathinam, S. Darbha) [37]. Преобразование состоит из двух этапов. На первом из них МЗКВ с несколькими точками отправления сначала преобразуется к обобщенной ЗКВ. На втором этапе осуществляется преобразование к обычной асимметричной ЗКВ. В результате для каждого коммивояжера создается множество копий точек назначения  $\{V_{m+1}^i, \dots, V_{m+n}^i\}$  и копия точки отправления, именуемая конечной точкой. Получившаяся асимметричная задача коммивояжера характеризуется количеством вершин, равным  $(n+2)m$ . Методика расстановки весов в результирующем графе подробно рассмотрена в [37]. Авторы настоящей работы предлагают использовать в качестве основы разрабатываемого алгоритма выбора маршрутной сети первый этап описанного преобразования и решать полученную обобщенную ЗКВ напрямую. При этом преобразование к асимметричной ЗКВ заменяется дополнительным ветвлением в весовой функции. Количество вершин в результирующем графе (рис. 3), таким образом, сокращается до  $(2m+n)$ .

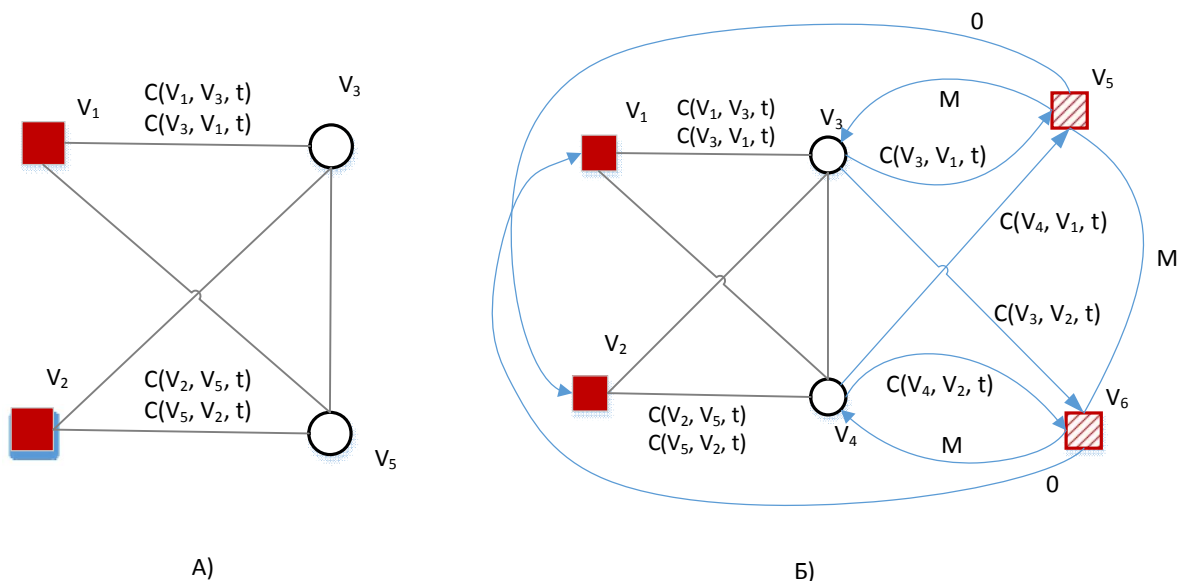


Рисунок 3 – Пример преобразования МЗКВ к асимметричной ЗКВ:  
 А – граф оригинальной МЗКВ; Б – граф трансформированной ЗКВ с одним коммивояжером



Возможность решения ЗКВ с одним агентом точными методами подробно рассмотрена в [46]. Такой подход труднореализуем из-за наличия зависимости от времени в весовой функции (1). Однако нахождение приближительного решения возможно с использованием современных эвристических методов.

В общем виде алгоритм выбора маршрутной сети можно представить следующим образом (рис. 4).

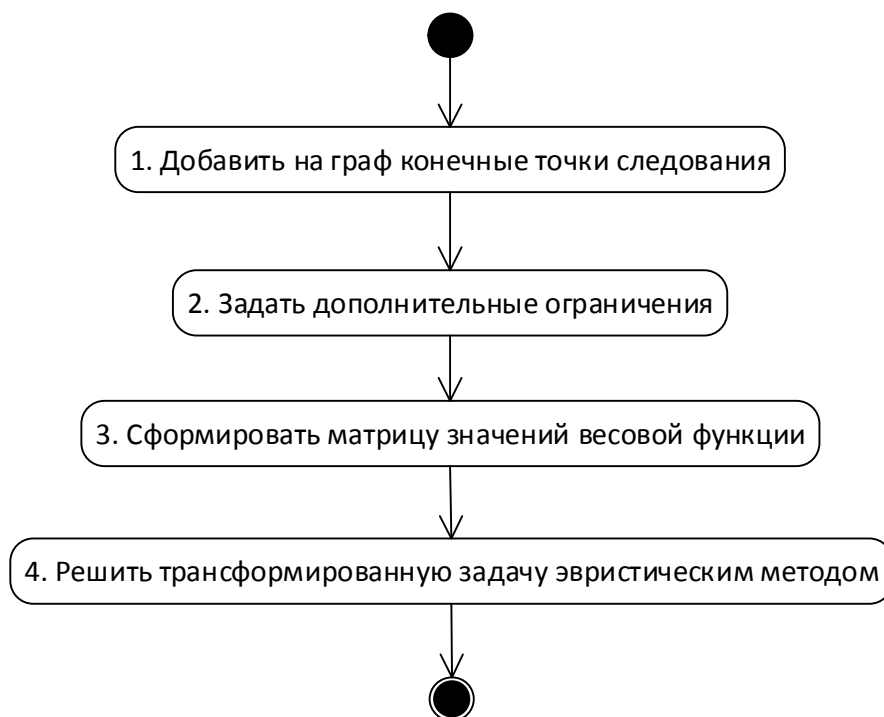


Рисунок 4 – Алгоритм решения задачи выбора маршрутной сети аудита

Прокомментируем подробнее отдельные этапы этого алгоритма.

1. Добавление на граф конечных точек для каждого коммивояжера – копий точек отправления  $\{V_{m+n+1}, \dots, V_{2m+n}\}$ . Веса для новых дуг на графе определяются как:

- $C(V_j, V_{m+n+i}, t) = C(V_j, V_i, t)$ , для всех  $i < m$ ,  $m+1 \leq j \leq m+n$
- $C(V_{m+n+i}, V_{i+1}, t) = 0$  – для всех  $i < m$ ;
- $C(V_{2m+n}, V_0, t) = 0$ ;
- $C(V_{m+n+i}, V_j, t) = M$ , для остальных  $i < m$ ,  $m+1 \leq j \leq m+n$ , где  $M$  – достаточно большая константа.

большая константа.

Проведенная таким образом трансформация позволяет перейти к ЗКВ с одним коммивояжером, при этом каждая конечная точка  $V_{m+n+i}$  устанавливает границу множества  $T_i$  МЗКВ в решении трансформированной задачи: во множество  $T_i$  для всех  $i \leq m$  входят все точки, расположенные между  $V_i$  и  $V_{m+n+i}$  в решении.

Установка дополнительных ограничений на множество допустимых решений трансформированной задачи в соответствии с ограничениями предметной области. В качестве допустимого решения на каждой итерации может быть принято только такое решение, для которого выполняется условие:  $|T'| \geq Z + 1$  для любого  $T'$  из (1), где  $Z$  – минимальное количество точек, которое должен посетить каждый аудитор.

2. Формирование матрицы значений весовой функции (1), на основе доступных данных о трафике и местоположении точек в единицах измерения времени.

3. Решение трансформированной задачи с использованием эвристического метода, поддерживающего все перечисленные выше ограничения трансформированной задачи. Такое решение должно быть выполнено с использованием модифицированной функции определения времени отправления ком-

мивояжера. Это позволяет начинать отсчет времени в трансформированной задаче заново для каждого множества  $T' \subseteq T = \{V_{1_1}, V_{1_2}, \dots, V_{1_{2m+n}}\}$ , соответствующего оптимальному маршруту следования комивояжера в исходной задаче.

Предложенный алгоритм позволяет уменьшить размерность итоговой задачи до  $(n+2m)$ , и, решив ее, получить также решение исходной задачи с учетом всех дополнительных ограничений предметной области.

**Программное обеспечение выбора маршрутной сети аудита.** Апробация методики была проведена с использованием разрабатываемой авторами геоинформационной системы мониторинга торговых и промышленных объектов, подробно рассмотренной в [5]. В соответствии с клиент-серверной моделью веб-ориентированной ГИС, в программном обеспечении (ПО) веб-ГИС мониторинга торговых и промышленных объектов можно выделить пять основных составляющих частей (рис. 5).

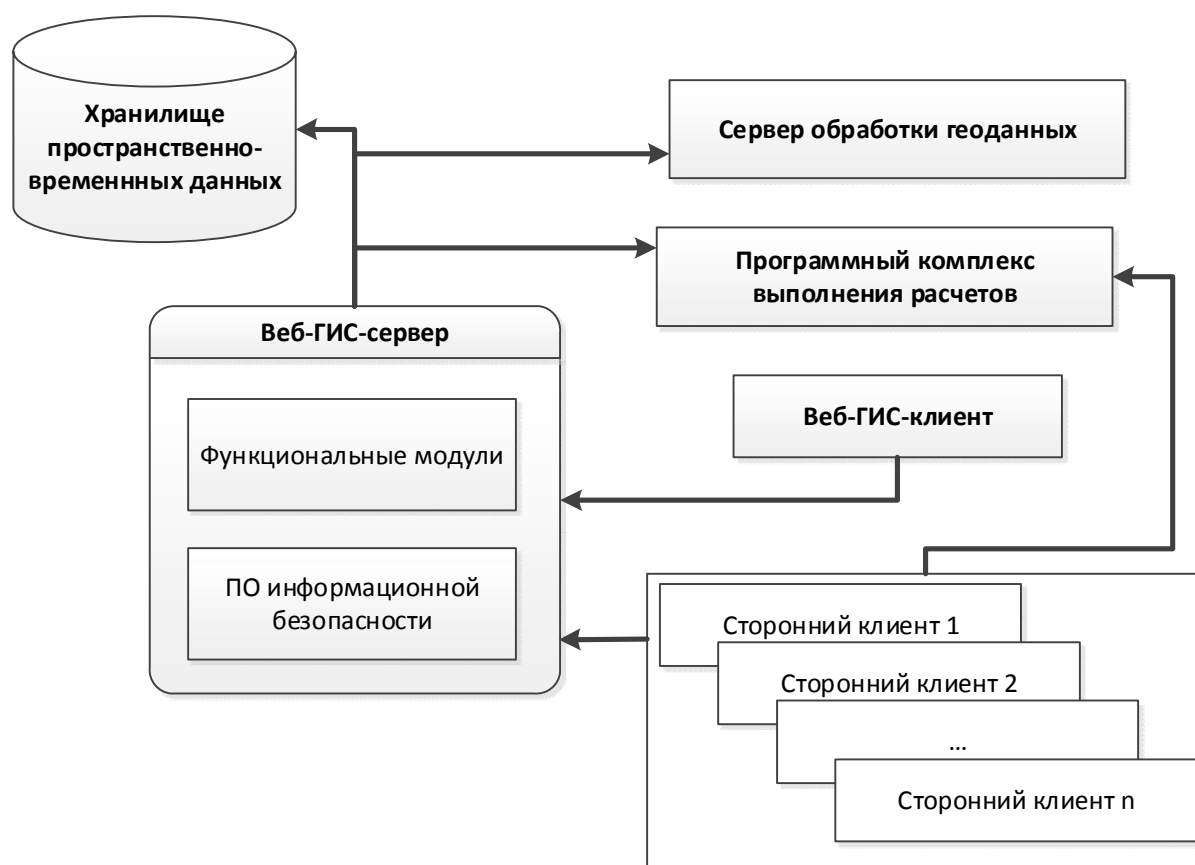


Рисунок 5 – Основные составляющие экосистемы ПО веб-ГИС мониторинга торговых и промышленных объектов

1. ПО веб-ГИС-клиента, предоставляющего графический пользовательский интерфейс доступа к функциям обработки данных.

2. ПО веб-ГИС-сервера, реализующее бизнес-логику системы и отвечающее за обработку пространственных и атрибутивных данных объектов мониторинга; организацию взаимодействия ПО мониторинга торговых и промышленных объектов со сторонними информационными системами. ПО веб-ГИС-сервера также включает в себя программную подсистему информационной безопасности, обеспечивающую организацию и ведение многопользовательского регламента доступа к системе.

3. ПО хранилища пространственно-временных данных системы.

4. Сервер обработки геоданных, отвечающий за низкоуровневую обработку пространственных данных и выполнение простейших функций геоинформационного анализа.

5. Программная подсистема выполнения расчетов. Она отвечает за выполнение необходимых математических вычислений над данными в хранилище.

В ходе выполнения настоящей работы была спроектирована и реализована подсистема выполнения расчетов для решения задачи выбора оптимальной маршрутной сети, которая может быть использована как отдельный сервис для проведения математических расчетов. Также эта подсистема была интег-

рирована в ГИС WGS3 с использованием внешнего API системы [3]. В качестве эвристического алгоритма подсистемы может быть реализован любой известный алгоритм, позволяющий проводить вычисления с весовой функцией, зависящей от времени следования между вершинами графа. В рамках настоящей работы для примера был выбран метод имитации отжига по причине его простоты для практической реализации.

Программный продукт был апробирован на задаче построения оптимального маршрута следования аудиторов по продуктовым магазинам г. Томска при проведении маркетингового исследования. В рамках поставленной задачи за один визит на торговый объект аудитор может провести инвентаризацию товаров, выбранных для отдельного исследования, и сопутствующего оборудования; оценить объем запасов товара, качество дилерской поддержки и уровень цен. Проведение аудита торговых точек подобным образом позволяет оценить общий размер рынка сбыта и размер доли рынка, принадлежащей товару определенной марки; выявить магазины, в которых наблюдается дефицит товара или проблемы с его размещением на полках. Задача поддержания перечня актуальных данных о торговых объектах в пределах региона подробно рассмотрена в [10]. Для проведения апробации разработанного программного средства из открытых источников были собраны сведения о 439 организациях, местоположение которых было геокодировано и нанесено на карту, представленную в цифровой форме.

На основе полученной базы геоданных торговых объектов были сформулированы две тестовые задачи: обследование 90 круглосуточно работающих продуктовых магазинов города и проведение аудита 40 торговых объектов сети супермаркетов «Абрикос». Прогнозируемая продолжительность нахождения аудитора на торговом объекте была принята равной 5 минутам. В случае задержки аудитора на каком-либо из объектов мониторинга дольше запланированного времени, программное обеспечение предполагает возможность динамического перестроения маршрутной сети для всех аудиторов – с учетом актуальных сведений о дорожной обстановке в режиме реального времени. Каждая из этих двух задач была рассмотрена с различным количеством коммивояжеров.

Пример с результатом решения представлен на рисунке 6.

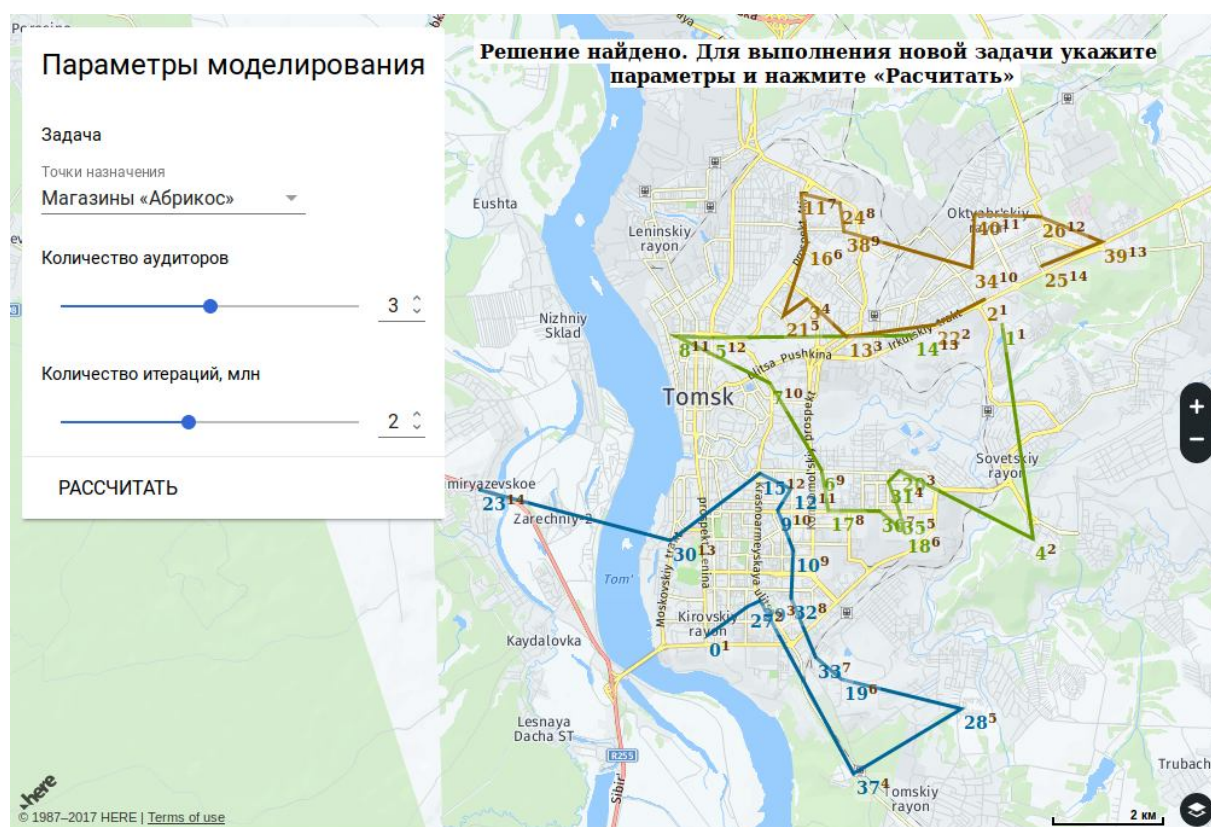


Рисунок 6 – Построение маршрута следования аудиторов по круглосуточно работающим магазинам г. Томска

Результаты работы предложенного алгоритма были сравнены со следующим. (1) Результатами применения классического алгоритма имитации отжига без учета дополнительных ограничений, накладываемых предложенной моделью, с аналогичными параметрами: одинаковой начальной температурой, функцией изменения температуры со временем и равном количестве итераций. (2) Реализацией варианта генетического алгоритма для решения МЗКВ, описанного в [32]. (3) Результатами работы модуля

NetworkAnalyst программного обеспечения ESRI ArcMap 10.2, реализующего проприетарный алгоритм, основанный на методе табу-поиска [1].

Вычисления были проведены сто раз для каждого из алгоритмов в рамках отдельной задачи. Как уже было сказано выше, решение поставленной задачи с использованием точных алгоритмов не представляется возможным – из-за характера весовой функции сформулированной МЗКВ и большого количества вершин графа.

Результаты вычислений представлены в таблицах 1 и 2. Значения целевой функции (суммарное время нахождения аудиторов на маршруте) приведено в секундах.

Таблица 1 – Результаты апробации предложенного алгоритма (первая часть)

Задача	Предложенный алгоритм		Классический – реализация алгоритма имитации отжига	
	Среднее арифметическое результата целевой функции (сек.)	Среднеквадратичное отклонение (%)	Среднее арифметическое результата целевой функции (сек.)	Среднеквадратичное отклонение (%)
МЗКВ (5 коммивояжеров, 90 точек)	21460	1,19	23590	1,20
МЗКВ (3 коммивояжера, 90 точек)	21647	0,5	21943	1,1
МЗКВ (5 коммивояжеров, 40 точек)	11107	0,35	11309	0,29
МЗКВ (3 коммивояжера, 40 точек)	11365	0,28	11490	0,35

Таблица 2 – Результаты апробации предложенного алгоритма (вторая часть)

Задача	ESRI ArcMap 10.2		Генетический алгоритм	
	Среднее арифметическое результата целевой функции (сек.)	Среднеквадратичное отклонение (%)	Среднее арифметическое результата целевой функции (сек.)	Среднеквадратичное отклонение (%)
МЗКВ (5 коммивояжеров, 90 точек)	22462	1,12	23121	0,98
МЗКВ (3 коммивояжера, 90 точек)	21747	0,23	21809	1,1
МЗКВ (5 коммивояжеров, 40 точек)	11299	0,30	11309	0,26
МЗКВ (3 коммивояжера, 40 точек)	11428	0,22	114890	0,38

Представленные в этих таблицах результаты свидетельствуют о повышении эффективности вычислений при использовании предложенной в работе методики решения задачи выбора оптимальной маршрутной сети мониторинга по сравнению с классическим подходом, реализованным в существующих алгоритмах и не учитывающим всех особенностей предметной области. При этом улучшение результатов наблюдается при разном количестве коммивояжеров и точек назначения.

#### Выводы

1. В работе охарактеризована проблематика аудита промышленных и торговых объектов, предполагающего периодическое обследование территориально распределенных точек с проведением выездных работ.

2. Сформулирована постановка задачи выбора оптимальной маршрутной сети аудита территориально распределенных объектов с учетом ограничений и критериев оптимизации, специфичных для предметной области.

3. Предложенный алгоритм выбора оптимальной маршрутной сети мониторинга на основе разработанной модели предметной области позволяет организовать выездные работы на основе использования оптимального графика посещения объектов.

#### Список литературы

1. Алгоритмы, используемые дополнительным модулем ArcGIS Network Analyst [Электронный ресурс]. – Режим доступа к сайту: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm>, свободный.

2. Герасименко Н. М. Повышение конкурентоспособности организаций розничной торговли на основе рационализации ассортимента товаров (на примере товаров предварительного выбора): монография / Н. М. Герасименко, Т. А. Торопова – Хабаровск: РИЦ ХГАЭП. – 2015. – 116 с.

3. Гриценко Ю. Б. Интерфейс взаимодействия геоинформационной технологии ведения электронного генерального плана со сторонними программными системами / Ю.Б. Гриценко и [др.] // Доклады ТУСУР. – 2013. – №1 (27). – С.129-134
4. Дмитриенко В. Е. Геопортал автомобильных дорог / В. Е. Дмитриенко, А. В. Скворцов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2013. – №1. – С. 42-46.
5. Ерунова М. Г. Геоинформационное обеспечение задач экологического мониторинга особо охраняемых территорий / М. Г. Ерунова, А. А. Гостева, О. Э. Якубайлик // Журнал сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. – 2008. – №4(1). – С. 366-376.
6. Ехлаков Ю. П. Геоинформационные технологии мониторинга инженерных сетей: Монография / Ю. П. Ехлаков, Ю. Б. Гриценко, О. И. Жуковский — Томск: ТУСУР. – 2010. – 149 с.
7. Кудж С.А. Геомониторинг как процесс познания // Перспективы науки и образования. – 2015. – № 1(13). – С. 24-29.
8. Майоров А.А. Геомаркетинговые исследования // Геоинформатика в научных исследованиях Арктики. – 2014. – №5(8). – С.43-48.
9. Мусаев В.К. Об анализе безопасности и технического состояния строительных объектов / В. К. Мусаев [и др.] // Двойные технологии №2 (63). – 2013. – С. 26-28.
10. Мазанкова Т. В. Опыт структурного анализа и оценки конкурентной ситуации в общественном питании региона (на примере Хабаровского края и г. Хабаровска) // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014-№3. – С. 18-33. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3\(27\)/18-33.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3(27)/18-33.pdf))
11. Ольховатенко В. Е. Разработка комплексной системы геомониторинга природно-технических систем на оползнеопасных территориях г. Томска / В. Е. Ольховатенко, В. М. Лазарев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – №8 (39) . – С. 59-63.
12. Павлов А.А. Геотехнический мониторинг объектов в условиях плотной застройки [Электронный ресурс]. – Geoinfo.ru. Информационный ресурс для инженеров-исследователей. – Режим доступа к сайту: <http://www.geoinfo.ru/files/pavlov.pdf>, свободный.
13. Павлов А.И. Геоинформационный мониторинг городских территорий // Науки о Земле. – 2012. – №4. – С. 59-64.
14. Постановление правительства Российской Федерации от 25 апреля 2012 года №390 “О противопожарном режиме” (ред. от 21.03.2017) // СПС КонсультантПлюс.
15. Савиных В.П., Цветков В.Я. Исследование северных территорий методами геоинформатики // Образовательные ресурсы и технологии. 2014. №5 (8). С. 14-23.
16. Уханов В. П. Экологический мониторинг состояния особо охраняемых природных территорий / В. П. Уханов, С. М. Хамитова, Ю. М. Авдеев // Охрана окружающей среды. Экология человека. – 2016. – №1. – С. 66-71.
17. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности" // СПС КонсультантПлюс.
18. Angel R. D. Computer-assisted school bus scheduling / R. D. Angel, W. L. Caudle, R. Noonan, A. N. D. A. Whinston // Management Science. – 1972. – №18(6). – С. B-279 - B-288.
19. Bektas T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures // Omega: The International Journal of Management Science. – 2006. – №34 (3). – С. 209-219.
20. Bellmore M. Transformation of multisalesman problem to the standard traveling salesman problem / M. Bellmore, S. Hong // Journal of the ACM (JACM). – 1974. – №21(3). – С. 500-504.
21. Calvo R. W. A heuristic approach to the overnight security service problem / R.W. Clavo, R. Cordone // Computers & Operations Research. – 2003. – №30(9). – С. 1269-1287.
22. Chuang H. H. On-Shelf Availability, Retail Performance, and External Audits: A Field Experiment / H. Chuang, R. Oliva, S. Liu // Production and Operations Management. – №5(5). – С. 935-951.
23. Chuang H. H. Mathematical modeling and Bayesian estimation for error-prone retail shelf audits // Decision Support System. – 2015. – Т. 80(C). – С. 72-82.
24. Chuang H. H. Empirical modeling of inventory record audit policies / H. H. Chuang, R. Oliva // Working Paper, Mays Business School, Texas A&M University, College Station, TX. – 2013.
25. Fogel D. B. A parallel processing approach to a multiple traveling salesman problem using evolutionary programming // Proceedings of the fourth annual symposium on parallel processing. Fullerton, CA. – 1990. – С. 318-326.
26. Gilbert K. C. A New Multiperiod Multiple Traveling Salesman Problem with Heuristic and Application to a Scheduling Problem / K. C. Gilbert, R. B. Hofstra // Decision Sciences. – 1992. – № 23(1). – С. 250–259.
27. Gorenstein S. Printing press scheduling for multi-edition periodicals // Management Science. – 1970. – Т. 16. – №6. – С. B-373-B-383.
28. Hong S. Technical Note – A Note on the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem with Fixed Charges / S. Hong, M. W. Padberg // Operations Research. – 1977. – №25(5). – С. 871-874.
29. Hsu C. A study of feature-mapped approach to the multiple travelling salesmen problem / C. Hsu, M. Tsai, W. Chen // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 1991. – Т. 3. – С. 1589–1592.
30. Hughes J. S. Optimal internal audit timing // The Accounting Review. – 1977. Т. LII. – № 1. – С. 56-68.
31. Kim K. H. A crane scheduling method for port container terminals / K. H. Kim, Y. M. Park // European Journal of Operational Research. – 2004. – №156 (3). – С. 752–768.
32. Kivelevitch E. A Market-Based Solution to the Multiple Traveling Salesmen Problem / M. Kumar, K. Cohen // Intelligent Robot Systems. – 2013. – 72: 21. doi:10.1007/s10846-012-9805-3.
33. Lenstra J. K.. Complexity of vehicle routing and scheduling problems / J. K. Lenstra, A. H. G. R. Kan // Networks. – 1981. – Т.11. – №2. – С. 221-227.

34. Milikhin M. M. Using web-based geoinformation technologies within micro geo-marketing researches / M. M. Milikhin и [др.] // 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2016 – Proceedings. – 2016. – С. 653-657.
35. Modares A. A self-organizing neural network approach for multiple traveling salesman and vehicle routing problems / A. Modares, S. Somhom, T. Enkawa // International Transactions in Operational Research, 6. – 1999. – P. 591-606.
36. Morey R. Optimal Timing of Account Audits in Internal Control / R. Morey, D. Dittman // Management Science. – 1986. – Т. 32. – № 3. – С. 272-282.
37. Oberlin P. Today's Traveling Salesman Problem / P. Oberlin, S. Rathinam, S. Darbha // IEEE Robotics & Automation Magazine. IEEE. – 2010. – Т.17. – № 4. – С. 70-77.
38. Okonjo-Adigwe C. An effective method of balancing the workload amongst salesmen // Omega. – 1988. – № 16(2). – С. 159-163.
39. Papadimitriou C.H. The Euclidean travelling salesman problem is NP-complete // Theoretical Computer Science, 1977. Т.4, №3, ISSN 0304-3975, С. 237-244.
40. Ryan L. Reactive Tabu search in unmanned aerial reconnaissance simulations / L. Ryan, T. G. Bailey, J. T. Moore, W. B. Carlton // Proceedings of the 1998 winter simulation conference. – 1998. – Т.1. – С. 873-879.
41. Saleh H. A. The Design of the Global Navigation Satellite Systems Surveying Networks Using Genetic Algorithms / H. A. Saleh, R. Chelouah // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2004. – Т.17. – № 1. – P. 111-122.
42. Sallim J. ACOPIN: An ACO Algorithm with TSP Approach for Clustering Proteins from Protein Interaction Network / J. Sallim, R. Abdullah, A. T. Khader // Second UKSIM European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Liverpool. – 2008. – С. 203-208.
43. Sandoh H. Theoretical study on optimal inventory-taking frequency for retailing / H. Sandoh, H. Shinamoto // Journal of Retailing and Consumer Services. – 2001. – №8(1) – С. 47-52.
44. Svestka J. A. Computational experience with an m salesman traveling salesman algorithm / J. A. Svetska, V. E. Huckfeldt // Manage Sci. – 1973. – №19. – С. 790-798.
45. Tang L. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shangai Baoshan Iron & Steel Complex / L. Tang, J. Liu, A. Rong, Z. Yang // European Journal of Operational Research. – 2000. – Т.124. – P. 267-82.
46. Ulyanov M. V. Resource characteristics of ways to organize a decision tree in the branch-and-bound method for the traveling salesmen problem / M. V. Ulyanov, M. I. Fomichev // Business Informatics. – 2015. – № 4 (34). – P. 38-46.
47. Vakhutinsky A. I. Solving vehicle routing problems using elastic nets / A. I. Vakhutinsky, B. L. Golden // Neural Networks, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., 1994 IEEE International Conference on, Orlando, FL. – 1994. – Т.7. – С. 4535-4540.
48. Wacholder E. An extension of the hop field-tank model for solution of the multiple traveling salesmen problem / E. Wacholder, J. Han, R. C. Mann // IEEE International Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No.88CH2632-8). – 1988. – С. 305-324.
49. Yu Z. An implementation of evolutionary computation for path planning of cooperative mobile robots / Yu Z. и [др.] // In Intelligent Control and Automation, 2002. Proceedings of the 4th World Congress. IEEE. – 2002. – Т. 3. – С. 1798-1802).
50. Zhang T. Team scheduling by genetic search / T. Zhang, W. Gruver, M. Smith // Proceedings of the second international conference on intelligent processing and manufacturing of materials. – 1999. – Т.2. – С. 839-844.

#### References

1. Algoritmy, ispol'zuemye dopolnitel'nym modulem ArcGIS Network Analyst [Algorithms used by the additional module ArcGIS Network Analyst], <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm>.
2. Gerasimenko N. M., Toporova T. A. Povyshenie konkurentosposobnosti organizacij roznichnoj trgovli na osnove racionalizacii assortimenta tovarov (na primere tovarov predvaritel'nogo vybora): monografija [Increasing of competitiveness of retail organizations on the basis of rationalization of assortment of goods (on the example of goods of preliminary choice): monograph]. Khabarovsk: KhGAEP, 2015.
3. Gritsenko Yu. B., Zhukovsky Yu. B., Lazarev I. V., Milikhin M. M., Senchenko P.V. Interfejs vzaimodejstviya geoinformacionnoj tehnologii vedenija jelektronnogo general'nogo plana so storonnimi programmnyimi sistemami [Interface of interaction of geo-information technology of electronic master plan with third-party software systems]. *Doklady TUSUR* [Reports of TUSUR], 2013, no. 1 (27) pp.129-134.
4. Dmitrienko V. E., Skvortsov A. V. Geoportall avtomobil'nyh dorog [Geoportall of highways], *SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog* [CAD and GIS for roads], 2013, no 1, pp. 42-26.
5. Erunova M. G., Gosteva A. A., Yakubajlik O. Ye. Geoinformacionnoe obespechenie zadachjekologicheskogo monitoringa osobo ohranjaemyh territorij [Geoinformation support of tasks of ecological monitoring of specially protected territories]. *Zhurnal sibirskogo federal'nogo universiteta. Serija: tehnika i tehnologii* [Journal of Siberian Federal University. Series: Technology and Technology], 2008, no 4(1), pp. 366-376.
6. Ekhlakov Yu. P., Gritsenko Yu. B., Zhukovsky Yu. B. Geoinformacionnye tehnologii monitoringa inzhenernyh setej: Monografija [Geoinformation technologies of monitoring of engineering networks: Monograph], Tomsk: TUSUR, 2010, 149 p.
7. Kudzh S.A. Geomonitoring kak process poznanija [Geomonitoring as a process of cognition] // *Perspektivy nauki i obrazovanija* [Perspectives of science and education], 2015, no 1(13), pp. 24-29.
8. Mayorov A. A. Geomarketingovyje issledovanija [Geomarketing researches]. *Geoinformatika v nauchnyh issledovanijah Arktiki* [Geoinformatics in Arctic scientific research], 2014, no 5(8), pp.43-48.

9. Musaev V. K. et al. Ob analize bezopasnosti i tehničeskogo sostojanija stroitel'nyh ob'ektov [On the analysis of safety and technical condition of construction objects]. *Dvojnye tehnologii* [Dual technologies], 2009, no 2 (63), pp. 26-28.
10. Mazznkova T. V. Opyt strukturnogo analiza i ocenki konkurentnoj situacii v obshhestvennom pitanii regiona (na primere Habarovskogo kraja i g. Habarovska) [The experience of structural analysis and assessment of the competitive situation in the public nutrition of the region (by the example of the Khabarovsk Territory and Khabarovsk)]. *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii*, 2014, no 3, pp. 18-33. ([http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3\(27\)/18-33.pdf](http://hi-tech.asu.edu.ru/files/3(27)/18-33.pdf))
11. Olkhovatenko V. E., Lazarev V. M. Razrabotka kompleksnoj sistemy geomonitoringa prirodno-tehničeskikh sistem na opolzneopasnykh territorijah g. Tomsk [Development of a complex system of geomonitoring of natural and technical systems in the landslide areas of Tomsk]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International scientific and practical journal], 2012, no 39, pp. 59-63.
12. Pavlov A. A. Geotehničeskij monitoring ob'ektov v usloviyah plotnoj zastrojki [Geotechnical monitoring of objects in dense housing]. *Geoinfo.ru. Informacionnyj resurs dlja inzhenerov-izyskatelej*. [Geoinfo.ru. Information resource for prospecting engineers], <http://www.geoinfo.ru/files/pavlov.pdf>.
13. Pavlov A. I. Geoinformacionnyj monitoring gorodskih territorij [Geoinformation monitoring of urban territories]. *Nauki o Zemle* [Sciences about the Earth], 2012, no 4, pp. 59-64.
14. Postanovlenie pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 25 aprelja 2012 goda №390 "O protivopozharnom rezhime" (red. ot 21.03.2017) [Decree of the Government of the Russian Federation, April 25, 2012, No. 390 "On Fire Prevention" (as amended on March 21, 2017)].
15. Savinyh V. P., Tsvetkov V. Ya. Issledovanie severnykh territorij metodami geoinformatiki [The study of northern territories by methods of geoinformatics]. *Obrazovatel'nye resursy i tehnologii* [Educational resources and technologies], 2014, no 5 (8), pp. 14-23.
16. Uhanov V. P., Hamitova S. M., Avdeev Ju. M. Jekologičeskij monitoring sostojanija osobo ohranjaemykh prirodnykh territorij [Ecological monitoring of the state of specially protected natural territories]. *Ohrana okruzhajushhej sredy. Jekologija cheloveka* [Environmental protection. Ecology of man.], 2016, no 1, pp. 66-71.
17. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 22 ijulja 2008 g. № 123-FZ "Tehničeskij reglament o trebovaniyah požarnoj bezopasnosti" [Federal Law of the Russian Federation, July 22, 2008 No. 123-FZ "Technical Regulations on Fire Safety Requirements"].
18. Angel R. D., Caudle W. L., Noonan R., Whinston A. N. D. A. Computer-assisted school bus scheduling. *Management Science*, 1972, no. 18(6), pp. B-279 - B-288.
19. Bektas T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2006, no. 34 (3), pp. 209-219.
20. Bellmore M., Hong, S. Transformation of multisalesman problem to the standard traveling salesman problem. *Journal of the ACM (JACM)*, 1974, no. 21(3), pp. 500-504.
21. Calvo R. W. Cordone R. A heuristic approach to the overnight security service problem. *Computers & Operations Research*, 2003, no. 30(9), pp. 1269-1287.
22. Chuang H., Oliva R., Liu S. On-Shelf Availability, Retail Performance, and External Audits: A Field Experiment. *Production and Operations Management*, 2016, vol. 5, no. 5, pp. 935-951.
23. Chuang H. Mathematical modeling and Bayesian estimation for error-prone retail shelf audits. *Decision Support Systems*, 2015, no 80, pp.72-82.
24. Chuang H., Oliva R. Empirical modeling of inventory record audit policies. *Working Paper, Mays Business School, Texas A&M University, College Station, TX*, 2013.
25. Fogel D. B. A parallel processing approach to a multiple traveling salesman problem using evolutionary programming. *Proceedings of the Fourth annual symposium on parallel processing*, Fullerton, CA, 1990, pp. 318-326.
26. Gilbert K. C., Hofstra R. B. A New Multiperiod Multiple Traveling Salesman Problem with Heuristic and Application to a Scheduling Problem. *Decision Sciences*, 1992, no. 23(1), pp. 250-259.
27. Gorenstein. S. Printing press scheduling for multi-edition periodicals. *Management Science*, 1970, vol.16, no. 6, pp. B-373-B-383.
28. Hong S., Padberg, M. W. Technical Note – A Note on the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem with Fixed Charges. *Operations Research*, 1977, no. 25(5), pp. 871-874.
29. Hsu C., Tsai M., Chen W. A study of feature-mapped approach to the multiple travelling salesmen problem. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 1991, vol. 3, pp. 1589-1592.
30. Hughes J. Optimal Internal Audit Timing. *The Accounting Review*, vol. LII, 1977, no. 1, pp. 56-68.
31. Kim K. H., Park Y. M. A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal of Operational Research*, 2004, no. 156 (3), pp. 752-768.
32. Kivelevitch E., Kumar M., Cohen K. A Market-Based Solution to the Multiple Traveling Salesmen Problem. *Intelligent Robot Systems*. – 2013. – 72: 21. doi:10.1007/s10846-012-9805-3.
33. Lenstra J. K., Kan A. H. G. R. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, vol.11, 1981, no. 2, pp. 221-227.
34. Milikhin M.M., Gritsenko Yu. B., Senchenko P. V., Zhukovsky O. I. Using web-based geoinformation technologies within micro geo-marketing researches. *Proceedings of the 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, AICT 2016, Baku, 2016, pp. 653-657.
35. Modares A., Somhom S., Enkawa T. A self-organizing neural network approach for multiple traveling salesman and vehicle routing problems. *International Transactions in Operational Research*, 1999, no. 6, pp. 591-606.
36. Morey R, Dittman D. Optimal Timing of Account Audits in Internal Control. *Management Science*, 1986, vol. 32, no. 3, pp. 272-282.

37. Oberlin P., Rathinam S., Darbha S. Today's Traveling Salesman Problem. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, IEEE, 2010, vol.17, no. 4, pp. 70-77.
38. Okonjo-Adigwe C. An effective method of balancing the workload amongst salesmen. *Omega*, 1988, no. 16(2), pp. 159-163.
39. Papadimitriou C.H. The Euclidean travelling salesman problem is NP-complete. *Theoretical Computer Science*, 1977. vol. 4, no 3, ISSN 0304-3975, pp. 237-244.
40. Ryan L., Bailey T.G., Moore J. T., Carlton W.B. Reactive Tabu search in unmanned aerial reconnaissance simulations. *Proceedings of the 1998 winter simulation conference*, Grand Hyatt Washington, Washington DC, 13-16 December 1998, 1998, vol.1, pp. 873-879.
41. Saleh H. A., Chelouah R. The Design of the Global Navigation Satellite Systems Surveying Networks Using Genetic Algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2004, vol.17, no. 1, pp. 111-122.
42. Sallim J., Abdullah R., Khader A. T ACOPIN: An ACO Algorithm with TSP Approach for Clustering Proteins from Protein Interaction Network. *Proceedings of the Second UKSIM European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Liverpool, 8-10 September 2008*, 2008, pp. 203-208.
43. Sandoh H., Shinamoto H. Theoretical study on optimal inventory-taking frequency for retailing. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2001, no 8(1), pp. 47-52.
44. Svestka J. A., Huckfeldt J. A. Computational experience with an m salesman traveling salesman algorithm. *Manage Sci*, 1973, no. 19, pp.790-798.
45. Tang L., Liu J., Rong A., Yang Z. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex. *European Journal of Operational Research*, 2000, vol.124, pp. 267-82.
46. Ulyanov M.V., Fomichev M.I. Resource characteristics of ways to organize a decision tree in the branch-and-bound method for the traveling salesman problem. *Business Informatics*, 2015, no. 4 (34). pp. 38-46. DOI: 10.17323/1998-0663.2015.4.38.46.
47. Vakhutinsky A.I., Golden B. L. (1994) Solving vehicle routing problems using elastic nets. *Proceedings of the Neural Networks, IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE International Conference, Orlando, FL, 1997*, vol.7, pp. 4535-4540.
48. Wacholder E., Han J., Mann R. C. An extension of the hop field-tank model for solution of the multiple traveling salesman problem. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No.88CH2632-8)*, 1988, pp. 305-324.
49. Yu, Z., Jinhai, L., Guochang, G., Rubo, Z., Haiyan, Y. An implementation of evolutionary computation for path planning of cooperative mobile robots. *Proceedings of the In Intelligent Control and Automation. 4th World Congress, IEEE*, 2002, vol. 3, pp. 1798-1802.
50. Zhang T., Gruver W, Smith M. Team scheduling by genetic search. *Proceedings of the Second international conference on intelligent processing and manufacturing of materials*, 1999, vol. 2, pp. 839-844.

#### РЕДАКЦИОННЫЙ КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ

Как сказано в статье, «целью работы является повышение эффективности мониторинга территориально распределенных торговых и/или промышленных объектов на уровне города за счет выбора оптимальной маршрутной сети следования аудиторов с учетом реалий перемещений в условиях городской среды».

При разработке данной темы следовало бы показать также возможности и ограничения использования информационно-коммуникационных технологий, по крайней мере, в следующих направлениях: дистанционного мониторинга объектов на уровне города, что потенциально позволяет уменьшить потребности в «очном» аудите; использования он-лайн информации из Интернет по дорожному движению, заторам и пр. для планирования (и необходимой оперативной корректировки) маршрутов следования аудиторов; фиксации результатов деятельности аудиторов в информационные системах – в т.ч. и в режиме реального времени по мере посещения ими объектов.

Достижение цели, заявленной в статье, фактически не показано. Не приведен критерий эффективности мониторинга. Как следствие: авторы не могут количественно оценить, каким образом выбор оптимальной маршрутной сети влияет на эффективность мониторинга; не предложены подходы к количественным оценкам того, насколько повышается эффективность мониторинга; также повышение эффективности мониторинга рассматриваемых в статье объектов не подтверждено экспериментально.

Следовательно, цель работы следовало бы, вероятно, сформулировать более узко.

Фактически в работе речь идет лишь об улучшении некоторых показателей работы алгоритма решения множественной задачи коммивояжера для оптимизации маршрутной сети перемещения аудиторов. Эти вопросы в статье рассмотрены достаточно полно и последовательно, приведен тематически сбалансированный литературный обзор, необходимый математический аппарат, проведены некоторые вычислительные эксперименты и пр.

Безусловно, рассматриваемые в статье постановки задач могут быть модифицированы (изменены) в различных направлениях. Однако стоило бы, вероятно, рассмотреть следующие вопросы: улучшения качества маршрутов, определяемых с использованием предлагаемых алгоритмов, по сравнению с ручным планированием тех же маршрутов; возможностей и эффективности использования параллельных вычислений для реализации предлагаемых алгоритмов и некоторых альтернативных им.

Отметим также, что данные, используемые для оптимизации маршрутов следования аудиторов, могут носить нечеткий (неточный) характер. Поэтому потенциально возможно рассмотрение задач в нечетких постановках и, как следствие, оценивание степени «устойчивости» получаемых оптимальных маршрутов по исходным данным. Однако это направление выходит за рамки рассматриваемой статьи.