

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ

С.А. Бейсеев<sup>1</sup>

standard-777@mail.ru

А.С. Наукенова<sup>1</sup>

n.a.s.1970@mail.ru

О.Н. Корсун<sup>2,3</sup>

marmotto@rambler.ru

Г.К. Ивахнюк<sup>4</sup>

fireside@inbox.ru

А.К. Тулекбаева<sup>1</sup>

tulekbaeva@mail.ru

С. Горо<sup>2</sup>

gorosekoi@gmail.com

<sup>1</sup> Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова,

г. Шымкент, Республика Казахстан

<sup>2</sup> МАИ, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> ФГПУ «ГосНИИАС», Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup> СПбГТИ(ТУ), Санкт-Петербург, Российская Федерация

---

### Аннотация

На основе методов исследования операций рассмотрены проблема совершенствования организации метрологического обеспечения предприятий и задача оптимизации маршрутов следования выездных метрологических групп, которая математически сведена к классической задаче коммивояжера. Приведен краткий обзор применяемых методов, показаны соотношения между ними. Предложены решения задач на основе современных геоинформационных систем и стандартных программных модулей из состава прикладных библиотек на языке Python. Отмечены простые методы проверки правильности результатов, полученных сотрудниками метрологических служб, не специалистами в области программирования и геоинформационных систем, что повышает вероятность ошибок. Для выявления ошибок, возникающих при работе с геоинформационными системами, с помощью которых определяется матрица расстояний между пунктами, предложена заимствованная из топографии простая формула расчета расстояний между точками с известными координатами. При развитой дорожной сети рассчитанные таким образом расстояния близки к результатам, получаемым в геоинформационных системах, учитывающих рас-

### Ключевые слова

*Метрологическое обеспечение, проверка средств измерений, исследование операций, задача коммивояжера, геоинформационные системы, оптимизация*

положение автомобильных дорог. Задача решена на примере организации поверки и ремонта средств измерений на предприятиях пищевой промышленности г. Шымкент и Туркестанской области Республики Казахстан

Поступила 24.09.2021

Принята 27.10.2021

© Автор(ы), 2022

---

**Введение.** Метрологическое обеспечение промышленных предприятий является сложной организационно-технической задачей. В целях ее успешного решения разработано и введено в действие большое число нормативных документов. В Республике Казахстан это в первую очередь закон<sup>1</sup> и стандарты государственной системы обеспечения единства измерений. Важнейшими процессами в системе метрологического обеспечения являются поверка и ремонт средств измерений (СИ), находящихся в эксплуатации. Поверочная деятельность и ответственность за нарушения метрологических норм и правил регламентированы национальным стандартом<sup>2</sup> и кодексом<sup>3</sup> Республики Казахстан. Следует отметить высокую степень согласованности нормативной базы в области метрологии в Российской Федерации и Республике Казахстан, что является результатом многолетней совместной работы.

Однако актуальной остается проблема совершенствования организации метрологического обеспечения на основе современных математических методов и информационных технологий [1–11], таких как исследование операций [1–3], нечеткая логика [4, 5], эволюционные алгоритмы оптимизации [6], теория принятия решений [7, 8], моделирование и анализ бизнес-процессов [9–11]. Эффективным организационным решением при проведении поверки СИ промышленных предприятий, пространственно-распределенных на некоторой территории, является использование выездных метрологических групп (ВМГ) [12, 13], включающих в себя квалифицированных специалистов и необходимое для поверки оборудование. Это является альтернативой традиционному варианту, когда СИ, для поверки которых недостаточно возможностей метрологических служб предприятий, направляются на территориальную метрологическую базу.

---

<sup>1</sup> Закон Республики Казахстан от 7 июня 2000 года № 53-ІІ «Об обеспечении единства измерений». URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=1018417](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=1018417)

<sup>2</sup> СТ РК 2.4–2019. Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения. URL: <https://www.egfntd.kz/rus/tv/398674.html>

<sup>3</sup> Кодекс Республики Казахстан «Об административных нарушениях» от 5 июля 2014 года № 235-V ЗПК. URL: [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=31577399](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31577399)

При этом СИ на длительное время изымаются из эксплуатации, а их перевозка к месту поверки и обратно увеличивает транспортные расходы. Применение ВМГ устраняет эти недостатки, поскольку поверка выполняется непосредственно на предприятиях. В связи с этим возникает задача оптимизации маршрутов следования ВМГ. В математическом отношении эта задача сводится к известной задаче коммивояжера [1, 2], для решения которой разработаны алгоритмы [2, 3] и библиотеки стандартных прикладных программ [14, 15]. Кроме того, для подготовки исходных данных необходимо привлечь какую-либо геоинформационную систему [16, 17], обеспечивающую работу с картами и прокладку маршрутов с учетом автомобильных дорог. Применение стандартных программных средств, особенно зарубежных и находящихся в открытом доступе, всегда сопряжено с возможностью ошибок как вследствие неправильных действий оператора, так и из-за ошибок в самих используемых программах.

Предлагаемую методику оптимизации маршрутов ВМГ рассмотрим на примере оптимизации метрологического обслуживания предприятий пищевой промышленности г. Шымкент и Туркестанской обл. (Республика Казахстан).

**Описание методов исследования.** Оптимизацию маршрута следования ВМГ целесообразно выполнять на основе известной в исследовании операций задачи коммивояжера [4], которая для  $n$  городов задается квадратной симметричной матрицей  $n$ -го порядка

$$C = \begin{bmatrix} - & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & - & \cdots & c_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & - \end{bmatrix},$$

где  $c_{ij}$  определяет стоимость пути (расстояния, времени) от города  $i$  до города  $j$ .

Для некоторых пар  $i, j$  непосредственный переход от  $i$  к  $j$  может быть запрещен. Тогда элемент  $c_{ij}$  матрицы  $C$  полагается равным бесконечности  $c_{ij} = \infty$ . Решение задачи коммивояжера — это некоторая последовательность  $c_{ij}$ , при которой суммарная стоимость пути с возвратом в исходный пункт будет минимальной.

Существует ряд методов решения задачи коммивояжера, рассмотрим некоторые из них.

**Метод перебора.** Решением задачи коммивояжера является последовательность объезда всех городов, задаваемая перестановкой на множестве индексов  $\sigma = \{1, 2, \dots, n\}$ .

Оптимальным решением будет перестановка  $i_1, i_2, \dots, i_n$ , минимизирующая суммарную стоимость маршрута

$$i_1 \rightarrow i_2 \rightarrow \dots \rightarrow i_n \rightarrow i_1,$$

$$c_{i_1 i_2} + c_{i_2 i_3} + c_{i_3 i_4} + \dots + c_{i_{n-1} i_n} + c_{i_n i_1}.$$

Здесь  $i_1, i_2, \dots, i_n$  — перестановка на множестве индексов  $\sigma = \{1, 2, \dots, n\}$  (мощность множества всех перестановок равна  $n!$ ). Метод перебора легко реализуется на любом языке программирования и обеспечивает определение глобального экстремума. Недостаток метода — число вариантов равно  $n!$ . Поэтому на практике время расчетов становится неприемлемо большим при числе пунктов  $n = 11-14$  (в зависимости от производительности компьютера).

**Метод ветвей и границ.** Простой рекуррентный алгоритм решения задачи коммивояжера [2, 3] предложен в 1963 г. В основе этого алгоритма лежит последовательное преобразование составленных определенным образом матриц  $C$ , приводящее к одной из трех следующих стандартных возможностей.

1. Получение решения (когда решение находится непосредственно по исходной матрице, если задача достаточно проста).
2. Исключение матрицы из дальнейшего рассмотрения (когда можно показать, что из нее не следует решение задачи).
3. Ветвление (когда решаемая задача приводится к рассмотрению двух вариантов менее громоздких задач).

Указанные операции повторяются до тех пор, пока не будут определены все шаги маршрута.

Таким образом, выполняется декомпозиция исходной задачи на совокупность более простых частных задач, что значительно уменьшает объем вычислений. Для рассматриваемой задачи метод ветвей и границ считается одним из лучших [1–3]. Его программная реализация не так проста, как в методе перебора, поэтому рекомендуется использовать стандартные библиотеки, например [15]. Отметим, что этот же принцип декомпозиции сложной задачи на совокупность более простых задач используется в таких известных методах, как динамическое программирование Беллмана и алгоритм быстрого преобразования Фурье [1, 2].

**«Жадный» метод.** Для сравнения рассмотрим «жадный» метод, в котором для нахождения наикратчайшего пути на каждом шаге выбирается самое короткое расстояние по правилу: «иди в ближайший город (в который еще не входил)». «Жадным» этот метод назван, вероятно, потому,

что решение принимается на основе сиюминутных соображений, без учета всей картины. По сути, это простейший вариант локальной оптимизации, в котором общий путь вычисляется по формуле

$$S = \min_j c_{1j} + \min_i c_{ji} + \dots + c_{n1},$$

где  $c_{n1}$  — расстояние от  $n$ -го (последнего) пункта до исходного.

**Упрощенный метод вычисления расстояний по координатам пунктов.** Расстояния между пунктами в настоящее время следует вычислять с помощью какой-либо геоинформационной системы, прокладывающей маршрут с учетом автомобильных дорог. В случае отсутствия такой системы или для дополнительной проверки целесообразно применять упрощенный метод [17], использующий значения географических координат пунктов. Опыт показывает [9], что при достаточно развитой сети дорог расхождения незначительны, поэтому парные расстояния между всеми предприятиями и метрологическим органом можно рассчитать по следующей упрощенной формуле [17]:

$$S_{ij} = \sqrt{((L_i - L_j) \Delta_x)^2 + ((B_i - B_j) \Delta_y)^2}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, N},$$

где  $L_i, B_i$  и  $L_j, B_j$  — долгота и широта первого и второго предприятий;  $\Delta_x = (\pi/180)R_3 \cos B$  — постоянная, характеризующая число километров в одном градусе по параллели, зависит от широты и определяется из допущений, что Земля — это шар ( $R_3 = 6378$  км — радиус Земли, согласно модели «Параметры Земли ПЗ-90») [16];  $\Delta_y = 111,12$  км — постоянная, характеризующая число километров в одном градусе по меридиану;  $N$  — число предприятий. Для широты г. Туркестан (Республика Казахстан)  $\Delta_x = 81,4$  км.

**Подготовка исходных данных.** Для совершенствования метрологической деятельности в части оптимизации организационных процессов поверки СИ выбраны 19 предприятий пищевой отрасли, расположенных в г. Шымкент и Туркестанской обл.

По цифровым картам определены географические координаты предприятий, а также расстояния от предприятий до исходной точки отсчета — поверочной лаборатории АО «Национальный центр экспертизы и сертификации» (АО «НаЦЭКС», г. Шымкент, ул. Алимбекова, д. 18), являющейся ведущей метрологической организацией в регионе и осуществляющей поверку различных видов СИ. Наименования предприятий, адреса, расстояния до исходной точки отсчета и географические координаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Исходные данные для оптимизации

Наименование предприятия	Расположение (адрес)	Расстояние, км	Долгота	Широта
АО «Шымкентмай»	г. Шымкент, ул. Есил, стр. 1	5,3	69°35'50"	42°17'27"
ТОО «Голден Кэмел»	г. Туркестан, ул. Асылбекова, д. 167	167	68°20'32"	43°30'79"
ТОО «Шымкент кус»	г. Шымкент, ЖМ Кызыл Жар, ул. Женис, д. 209	9,7	69°29'59"	42°20'26"
ТОО «Кайып-Ага»	Сайрамский р-н, с/о Кайнарбулакский, с. Касымбек Датка	18,8	69°38'06"	42°28'44"
ТОО «Барыс 2007»	г. Шымкент, кв-л 226, зд. 186	2,1	69°59'02"	42°34'17"
ТОО «ВИЗИТ»	г. Шымкент, ул. Толоби, д. 11	3,5	69°60'72"	42°30'97"
ТОО «Азия-Холод»	г. Шымкент, ул. Макталы	3,9	69°56'76"	42°33'10"
ТОО «Рауан»	г. Шымкент, ул. 2-я Зеленая балка	2,8	69°62'07"	42°31'82"
ТОО «Балмуздак»	Толембийский р-н, с. Биринши Мамыр	39,8	69°88'90"	42°10'19"
ТОО «Болашак 7»	г. Шымкент, Индус, зона «Гассай»	14,5	69°75'42"	42°35'14"
ТОО «Юникс»	г. Шымкент, ЖМ Сайрам, зд. 8/2	14,5	69°75'42"	42°35'14"
ТОО «Рахат-Шымкент»	г. Шымкент, ул. К. Цеткин, д. 63	5,5	69°62'47"	42°29'79"
СПК «Хамит»	Туркестанская обл., г. Шардара	255	67°96'10"	41°31'61"
ТОО «Ордабасы кус»	Ордабасинский р-н, с. Бадам	33	69°27'17"	42°39'48"

Окончание табл. 1

Наименование предприятия	Расположение (адрес)	Расстояние, км	Долгота	Широта
ТОО «Каркын 2030»	Казыгуртский р-н, с/о Какпак, с. Сырлысай, ул. Мектеп, д. 10	105	69°52'74"	41°62'10"
ТОО «Сарыагаш кус»	Сарыагашский р-н, с/о Дарбаза	140	69°08'66"	41°56'55"
ТОО «J.F.M. Company»	Сайрамский р-н, с. Кутарыс	35	69°62'30"	42°60'19"
ТОО «Firkan Retail Group»	Сайрамский р-н, с. Кайнарбулак	150	69°04'83"	43°31'40"
ТОО «Компания Натур Продукт»	Сайрамский р-н, с. Акбулак, ул. Аксу	29	69°89'23"	42°38'32"

Виды применяемых на выбранных предприятиях СИ и сроки проверки приведены в табл. 2, число СИ, требующих поверки с разделением по видам измерений, — в табл. 3.

Таблица 2

## Перечень применяемых СИ и сроки их поверки

Вид измерения	СИ	Срок поверки, год
Измерение температуры	Термометры	3
Измерение относительной влажности в воздухе рабочей зоны	Психометры	1
Измерение скорости движения воздуха	Анеометры	1
Измерение атмосферного давления в воздухе рабочей зоны, кПа (мм рт.ст.)	Барометры	1
Измерение уровня звука	Шумомер	1
Измерение вибрации	Акселерометры, виброметры	1
Измерение массовой концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны	Газоанализаторы	1
Измерение параметров напряженности магнитного поля	Приборы контроля параметров магнитного поля	1
Измерение напряженности электрического поля	Приборы контроля параметров электрического поля	1
Измерение энергетической освещенности	УФ-радиометр	1
Измерение освещенности рабочей поверхности	Люксметр	1
Измерение яркости	Яркомер-фотометр	1
Измерение энергетической экспозиции лазерного излучения	Дозиметр лазерного излучения	1
Измерение коэффициента пульсации освещенности	Пульсметры	1
Измерение аэрозоля (пыли) преимущественно фиброгенного действия	Пылемеры, счетчики частиц, измерители пыли	1

Таблица 3

## Число требующих поверки СИ на обслуживаемых предприятиях

Наименование предприятия	РИП	ЭИП	ЭЩ	ТТ и МП	С
АО «Шымкентмай»	75	95	250	75	25
ТОО «Голден Кэмел»	40	35	130	20	0
ТОО «Шымкент кус»	20	30	90	10	0
ТОО «Кайып-Ата»	30	60	120	150	10
ТОО «Барыс 2007»	10	20	40	12	10
ТОО «ВИЗИТ»	10	10	13	15	20
ТОО «Азия-Холод»	90	147	230	0	43
ТОО «Рауан»	25	70	180	120	0
ТОО «Балмуздак»	10	20	40	15	10
ТОО «Болашак 7»	9	27	53	18	5
ТОО «Юникс»	70	120	210	100	40
ТОО «Рахат-Шымкент»	20	60	150	120	10
СПК «Хамит»	70	100	220	180	30
ТОО «Ордабасы кус»	10	20	60	40	15
ТОО «Каркын 2030»	20	50	150	120	10
ТОО «Сарыагаш кус»	20	40	100	100	30
ТОО «J.F.M. Company»	70	120	210	80	30
ТОО «Firkan Retail Group»	12	35	180	75	8
ТОО «Компания Натур Продукт»	35	50	150	130	18

*Примечание.* Поверяемые СИ разделены по видам измерений и включают в себя приборы: РИП — радиоизмерительные; ЭИП — электроизмерительные; ЭЩ — электрощитовые; ТТ и МП — теплотехнические и механические; С — сервисные.

Данные, приведенные в табл. 2 и 3, показывают, что потребности в поверке велики и по объемам работ и по разнообразию номенклатуры СИ. Это подтверждает целесообразность организации метрологического обслуживания с использованием ВМГ, принадлежащих специализированной организации, имеющей необходимое оборудование и квалифицированных специалистов.

**Решение задачи.** Приведем методику оптимизации маршрутов ВМГ на примере указанных исходных данных. Особое внимание уделим их анализу и дополнительным проверкам, направленным на исключение возможных ошибок.

**Предварительный анализ исходных данных.** До начала оптимизации целесообразно выполнить предварительный анализ исходных данных в целях возможного уменьшения размерности задачи. В результате анализа данных табл. 1 выявлено, что 19 рассматриваемых предприятий можно легко разделить на две группы или на два кластера, слабо связанных между собой. Первая группа — это предприятия, расположенные в г. Шымкент, расстояния до которых от начальной точки составляют единицы и десятки километров. Вторая группа — предприятия, расположенные в Туркестанской обл., где расстояния увеличиваются на порядок и составляют десятки и сотни километров. Такой прием значительно упрощает задачу, поскольку ее вычислительная сложность существенно зависит от размерности.

Итак, разделим предприятия на группы: в г. Шымкент 9 предприятий, в Туркестанской обл. 10 предприятий. Используя возможности прокладки маршрутов с учетом автомобильных дорог, например, на сайте Яндекс, заполним матрицы попарных расстояний между предприятиями г. Шымкент (табл. 4) и Туркестанской обл. (табл. 5). В обоих случаях начальным пунктом является АО «НаЦЭжС».

Матрицы расстояний, очевидно, симметричные, поэтому нижний треугольник в табл. 4 и 5 не заполнен. Диагональные элементы равны нулю как расстояния от пункта до этого же пункта. В табл. 5, например, столбец 4 второй строки показывает, что расстояние от ТОО «Голден Кэмел» до ТОО «Балмуздак» составляет 200 км.

**Сравнение результатов, полученных разными методами.** В качестве основного принят метод ветвей и границ, реализованный на языке Python [14] в библиотеке [15]. Для проверки авторы самостоятельно составили программу оптимизации маршрута методом перебора на языке Фортран 90. Оптимизация выполнялась обеими программами для двух групп предприятий, представленных в табл. 4 и 5. Для девяти предприятий г. Шымкент длина минимального маршрута составила 45,9 км, для 10 предприятий Туркестанской обл. — 951,8 км. Сравнение результатов, полученных методами ветвей и границ и перебора, проводилось для обеих задач по 6–10 пунктам. В большинстве случаев выявлено абсолютное совпадение маршрутов и их длин, в двух случаях маршруты различались незначительно (на 2...3 км). Учитывая, что метод перебора обеспечивает нахождение глобального экстремума, а метод ветвей и границ использует упрощающие допущения, можно сделать вывод, что метод ветвей и границ, реализованный в библиотеке [15] на языке Python, в большинстве случаев находит оптимальное решение, а в отдельных случаях приводит к субоптимальным решениям, имеющим несущественные погрешности.

Таблица 4

## Матрица расстояний для оптимизации маршрута (г. Шымкент)

Номер предприятия в городе $j$	Номер предприятия в городе $i$										Наименование предприятия
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	5,3	9,7	2,1	3,5	3,9	2,8	14,5	14,5	5,5	1. АО «НаЦЭКС»
2	-	0	14	19	4	8	5	7	18	4,2	2. ТОО «Шымкентмай»
3	-	-	0	22	12	7	15	20	15	1,9	3. ТОО «Шымкент кус»
4	-	-	-	0	13	16	14	17	10	14	4. ТОО «Барыс 2007»
5	-	-	-	-	0	6,5	2,2	4,6	5,3	2,3	5. ТОО «ВИЗИГ»
6	-	-	-	-	-	0	6,7	9,2	8	7	6. ТОО «Азия-Холод»
7	-	-	-	-	-	-	0	3,7	8	1,4	7. ТОО «Рауан»
8	-	-	-	-	-	-	-	0	11	2,9	8. ТОО «Болашак 7»
9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	6,7	9. ТОО «Юникс»
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	10. ТОО «Рахат-Шымкент»

Таблица 5

## Данные для решения задачи (Туркестанская обл.)

Номер предприятия в городе $j$	Номер предприятия в городе $i$											Наименование предприятия
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	0	167	18,8	39,8	255	33	105	140	35	150	29	1. АО «НаЦЭС»
2	-	0	160	200	270	140	250	260	160	100	190	2. ТОО «Голден Кэмвел»
3	-	-	0	57	280	52	120	170	16	140	31	3. ТОО «Кайып-Ата»
4	-	-	-	0	240	77	89	130	75	190	47	4. ТОО «Балмуздак»
5	-	-	-	-	0	230	190	140	270	300	300	5. СПК «Хамит»
6	-	-	-	-	-	0	120	120	50	120	76	6. ТОО «Ордабасы кус»
7	-	-	-	-	-	-	0	72	130	240	120	7. ТОО «Каркын 2030»
8	-	-	-	-	-	-	-	0	170	240	180	8. ТОО «Сарыагаш кус»
9	-	-	-	-	-	-	-	-	0	140	47	9. ТОО «J.F.M. Company»
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	170	10. ТОО «Firkan Retail Group»
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	11. ТОО «Компания Натур Продукт»

Получены также значения времени вычислений по обеим программам. Для числа пунктов не более девяти время расчета на персональной ЭВМ средней производительности составило десятые доли секунды в обоих случаях, т. е. было практически незаметным. При 10 и 11 пунктах время расчета по методу перебора составило соответственно 5 и 60 с, а по методу ветвей и границ осталось на прежнем уровне. При увеличении числа пунктов до 12 время расчета по методу перебора превысило 1 ч, что в данной задаче неприемлемо, а по методу ветвей и границ, как и следовало ожидать, осталось на практически незаметном прежнем уровне. Таким образом, содержащаяся в библиотеке [15] программная реализация метода ветвей и границ подтвердила свою работоспособность. Установлено также, что метод перебора можно применять при размерности задачи до  $n = 11$  для проверки правильности работы с библиотекой [15] или при отсутствии возможности работы со стандартными библиотеками.

Выполнялась также проверка правильности определения расстояний. Расстояния, полученные программой прокладки маршрута, сравнивались с результатами расчета по упрощенной формуле с использованием географических координат. Для проверки выбирались участки, для которых маршрут по автомобильной дороге примерно соответствовал движению по прямой. Расхождения составили 2...3 %. Применение дополнительных проверок при использовании программных средств, имеющих в открытом доступе в сети Интернет, является, на наш взгляд, важным этапом, поскольку возможны ошибки персонала при использовании этих программных средств. Кроме того, сами программы могут содержать ошибки. Пример оптимального маршрута по г. Шымкент приведен на рис. 1.

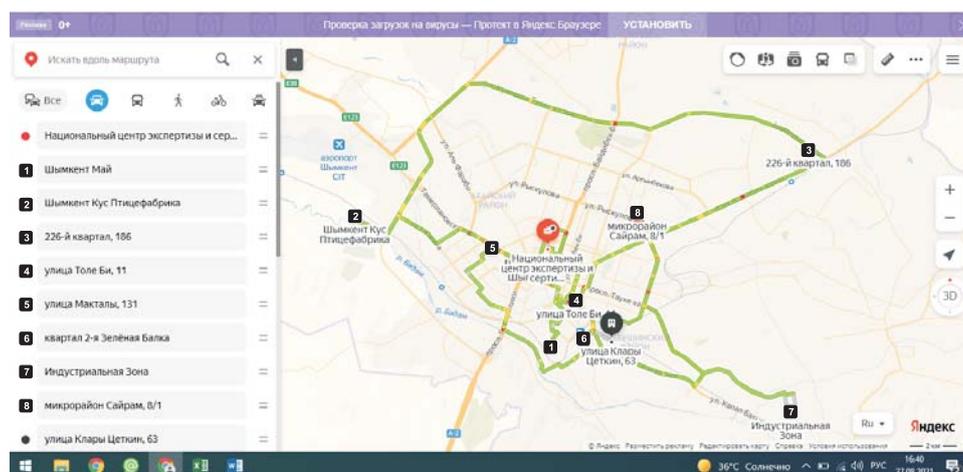


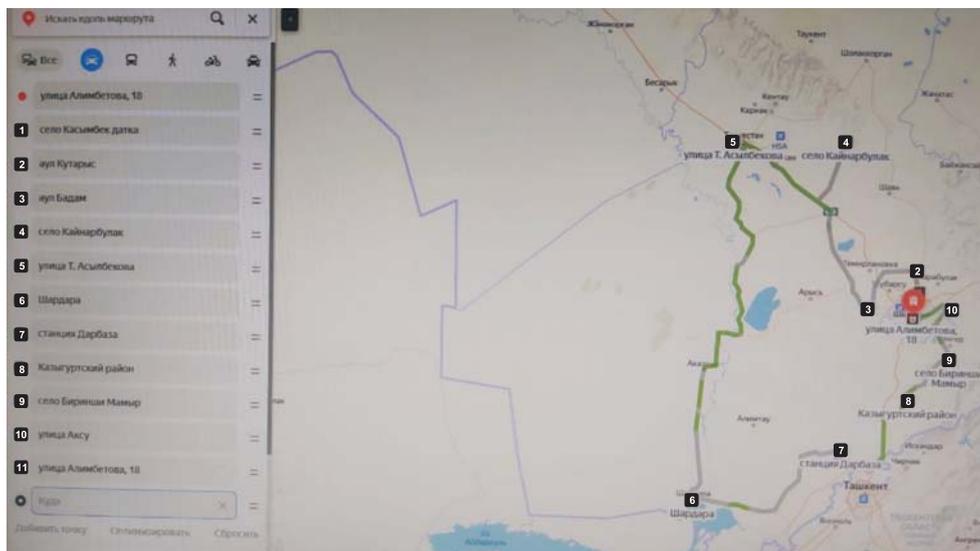
Рис. 1. Оптимальный маршрут объезда предприятий г. Шымкент, начиная с поверочной лаборатории АО «НаЦЭКС»

Маршрут по Туркестанской обл. приведем более детально. В табл. 6 указаны наименования, адреса и обозначения на карте и порядковые номера предприятий при следовании по оптимальному маршруту. Маршрут показан на рис. 2, он соответствует движению по замкнутому контуру, близкому к эллипсу: г. Шымкент (АО «НаЦЭКС») — г. Туркестан (с. Касымбек Датка, ТОО «Кайып-Ата»; аул Кутарыс, ТОО «J.F.M. Company»; аул Бадам, ТОО «Ордабасы кус»; с. Кайнарбулак, ТОО «Firkan Retail Group»; г. Туркестан, ТОО «Голден Кэмел») — г. Шардара (СПК «Хамит»; ст. Дарбаза, ТОО «Сарыгаш кус»; с. Сырлысай, ТОО «Каркын 2030») — с. Биринши Мамыр (ТОО «Балмуздак») — с. Акбулак (ТОО «Компания Натур Продукт») — г. Шымкент (АО «НаЦЭКС»). Это неслучайно [12], поскольку оптимальному маршруту обычно соответствует траектория, близкая к круговой или эллиптической, без пересекающихся или возвратно-поступательных движений. На практике это позволяют получить субоптимальные маршруты при невозможности использования рассмотренных средств оптимизации.

Таблица 6

## Предприятия Туркестанской обл.

Наименование предприятия	Адрес	Обозначение на карте
АО «НаЦЭКС»	г. Шымкент, ул. Алимбетова, д. 18	• ул. Алимбетова, д. 18
ТОО «Голден Кэмел»	г. Туркестан, ул. Асылбекова, д. 167	[5] ул. Т. Асылбекова
ТОО «Кайып-Ата»	Сайрамский р-н, с/о Кайнарбулакский, с. Касымбек Датка	[1] с. Касымбек Датка
ТОО «Балмуздак»	с. Биринши Мамыр Толейбийский р-н,	[9] с. Биринши Мамыр
СПК «Хамит»	г. Шардара	[6] г. Шардара
ТОО «Ордабасы кус»	Ордабасинский р-н, с. Бадам	[3] аул Бадам
ТОО «Каркын 2030»	Казыгуртский р-н, с/о Какпак, с. Сырлы-сайул, ул. Мектеп, стр. 10	[8] Казыгуртский р-н
ТОО «Сарыгаш кус»	Сарыгашский р-н, с/о Дарбаза	[7] ст. Дарбаза
ТОО «J.F.M. Company»	Сайрамский р-н, с. Кутарыс	[2] аул Кутарыс
ТОО «Firkan Retail Group»	Сайрамский р-н, с. Кайнарбулак	[4] с. Кайнарбулак
ТОО «Компания Натур Продукт»	Сайрамский р-н, с. Акбулак, ул. Аксу	[10] аул. Аксу



**Рис. 2.** Оптимальный маршрут объезда предприятий Туркестанской обл., начиная с поверочной лаборатории АО «НаЦЭКС»

**Заключение.** Приведена методика оптимизации маршрута движения выездных метрологических групп на примере метрологического обеспечения промышленных предприятий пищевой отрасли г. Шымкент и Туркестанской обл. Республики Казахстан. Даны характеристика применяемых методов оптимизации, рекомендации по выбору программного обеспечения, а также предложены методы дополнительной проверки правильности получаемых результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М., URSS, 2012.
- [2] Таха Х.А. Исследование операций. М., Диалектика, 2018.
- [3] Kaufmann A. Introduction a la combinatorique en vue des applications. Paris, Dunod, 1968.
- [4] Пащенко Ф.Ф. Нечеткие модели и системы управления. М., Ленанд, 2017.
- [5] Kaufmann A., Gupta M.M. Fuzzy mathematical models in engineering and management science. New York, Elsevier, 1988.
- [6] Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [7] Saaty T.L. Mathematical principles of decision making. RWS Publications, 2009.
- [8] Krasavin I.V., Yashin A.V., Tulekbaeva A.K. Hierarchy analysis for monitoring the uniformity of measurements system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2021, vol. 1027, art. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1027/1/012014>

- [9] Маклаков С.В. Моделирование бизнес-процессов с BPwin 4.0. М., Диалог–МИФИ, 2002.
- [10] Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум. М., Финансы и статистика, 2006.
- [11] Александров Д.В. Системное моделирование бизнеса. Владимир, ВлГУ, 2004.
- [12] Красавин И.В., Корсун О.Н. Оптимизация маршрутов следования выездных метрологических групп. *Метрология*, 2009, № 8, с. 28–38.
- [13] Красавин И.В., Корсун О.Н. Оптимизация состава метрологических групп. *Метрология*, 2009, № 9, с. 36–44.
- [14] Hunt J. A beginners guide to Python 3 programming. Nature Switzerland AG, Springer, 2020.
- [15] Traveling salesperson problem. *developers.google.com: веб-сайт*.  
URL: <https://developers.google.com/optimization/routing/tsp>  
(дата обращения: 15.02.2021).
- [16] Джанджгава Г.И. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. М., НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ, 2015.
- [17] Арбузов П.А. Геоинформационные системы. М., Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.

**Бейсеев Сакен Ануарбекович** — докторант, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова (Республика Казахстан, 160012, г. Шымкент, пр-т Тауке хана, д. 5).

**Науkenова Айгуль Сагындыковна** — канд. техн. наук, доцент Южно-Казахстанского университета имени М. Ауэзова (Республика Казахстан, 160012, г. Шымкент, пр-т Тауке хана, д. 5).

**Корсун Олег Николаевич** — д-р техн. наук, профессор, МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4); начальник лаборатории ФГУП «ГосНИИАС» (Российская Федерация, 125167, Москва, ул. Викторенко, д. 7).

**Ивахнюк Григорий Константинович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой СПбГТИ(ТУ) (Российская Федерация, 190013, Санкт-Петербург, Московский пр-т, д. 26).

**Тулeкбаева Айжамал Конисбаевна** — канд. техн. наук, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова (Республика Казахстан, 160012, г. Шымкент, пр-т Тауке хана, д. 5).

**Горо Секу** — аспирант, МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Бейсеев С.А., Наукенова А.С., Корсун О.Н. и др. Совершенствование организации метрологического обеспечения на основе методов исследования операций. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2022, № 2 (139), с. 60–78. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-2-60-78>

**IMPROVING THE ORGANIZATION OF METROLOGICAL SUPPORT BASED ON METHODS OF OPERATION RESEARCH**

S.A. Bejseev <sup>1</sup>	standard-777@mail.ru
A.S. Naukenova <sup>1</sup>	n.a.s.1970@mail.ru
O.N. Korsun <sup>2,3</sup>	marmotto@rambler.ru
G.K. Ivakhnyuk <sup>4</sup>	fireside@inbox.ru
A.K. Tulekbaeva <sup>1</sup>	tulekbaeva@mail.ru
S. Goro <sup>2</sup>	gorosekoi@gmail.com

<sup>1</sup>Mukhtar Auezov South Kazakhstan University, Chimkent, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup>State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS),  
Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>St. Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract**

The article considers the problem of improving the methods of organizing the metrological support of enterprises based on the methods of operation research as well as the problem of optimizing the traveling routes of metrological groups mathematically reduced to the classical traveling salesman problem. A brief overview of the methods used in this task is presented, and the relationships between them are shown. Solving the problems based on contemporary geographic information systems and standard software modules from the Python application libraries are proposed. Much attention is paid to simple methods for checking the correctness of the results obtained by standard methods, used by metrological service employees not specialized in the field of programming and geographic information systems, which increases the likelihood of errors. To identify errors occurring when working with geoinformation systems, allowing the matrix of distances between points to be determined, a simple formula borrowed from topography is proposed for calculating the distances between points with known coordinates. With a developed road network, the dis-

**Keywords**

*Metrological support, verification of measuring instruments, operations research, traveling salesman problem, geoinformation systems, optimization*

tances calculated in this way are close to the results obtained in geoinformation systems taking into account the location of highways. The results of solving the problem are given on the example of the organization of verification and repair of measuring instruments at food industry enterprises in the city of Chimkent and the Turkestan region of the Republic of Kazakhstan

Received 24.09.2021

Accepted 27.10.2021

© Author(s), 2022

---

## REFERENCES

- [1] Venttsel' E.S. Issledovanie operatsiy. Zadachi, printsipy, metodologiya [Operations research. Problems, principles, methodology]. Moscow, URSS Publ., 2012.
- [2] Taha H.A. Operations research. An introduction. Pearson, 2017.
- [3] Kaufmann A. Introduction a la combinatorique en vue des applications. Paris, Dunod, 1968.
- [4] Pashchenko F.F. Nechetkie modeli i sistemy upravleniya [Fuzzy models and control systems]. Moscow, Lenand Publ., 2017.
- [5] Kaufmann A., Gupta M.M. Fuzzy mathematical models in engineering and management science. New York, Elsevier, 1988.
- [6] Karpenko A.P. Sovremennye algoritmy poiskovoy optimizatsii [Modern algorithms of search optimization]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014.
- [7] Saaty T.L. Mathematical principles of decision making. RWS Publications, 2009.
- [8] Krasavin I.V., Yashin A.V., Tulekbaeva A.K. Hierarchy analysis for monitoring the uniformity of measurements system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2021, vol. 1027, art. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1027/1/012014>
- [9] Maklakov S.V. Modelirovanie biznes-protsessov s BPwin 4.0 [Modelling of business processes with BPwin 4.0]. Moscow, Dialog-MIFI Publ., 2002.
- [10] Cheremnykh S.V., Semenov I.O., Ruchkin B.C. Modelirovanie i analiz sistem. IDEF-tehnologii: praktikum [System modeling and analysis. IDEF-technologies: practice]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2006.
- [11] Aleksandrov D.V. Sistemnoe modelirovanie biznesa [Business system modeling]. Vladimir, VIGU Publ., 2004.
- [12] Krasavin I.V., Korsun O.N. Route optimization for onsite metrology group. *Metrologiya*, 2009, no. 8, pp. 28–38 (in Russ.).
- [13] Krasavin I.V., Korsun O.N. Staff optimization of metrology groups. *Metrologiya*, 2009, no. 9, pp. 36–44 (in Russ.).
- [14] Hunt J. A beginners guide to Python 3 programming. Nature Switzerland AG, Springer, 2020.
- [15] Traveling salesperson problem. *developers.google.com: website*. Available at: <https://developers.google.com/optimization/routing/tsp> (accessed: 15.02.2021).

[16] Dzhandzhgava G.I. Navigatsiya letatel'nykh apparatov v okolozemnom prostranstve [Aircraft navigation in near-Earth space]. Moscow, NAUCHTEKHLITIZDAT Publ., 2015.

[17] Arbuzov P.A. Geoinformatsionnye sistemy [Geographic information systems]. Moscow, VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo Publ., 2008.

**Bejseev S.A.** — Doctoral Student, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University (Tauke khana prospekt 5, Chimkent, 160012 Republic of Kazakhstan).

**Naukenova A.S.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University (Tauke khana prospekt 5, Chimkent, 160012 Republic of Kazakhstan).

**Korsun O.N.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation); Head of the Laboratory, State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS) (Viktorenko ul. 7, Moscow, 125167 Russian Federation).

**Ivakhnyuk G.K.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Institute of Technology (Moskovskiy prospekt 26, St. Petersburg, 190013 Russian Federation).

**Tulekbaeva A.K.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Mukhtar Auezov South Kazakhstan University (Tauke khana prospekt 5, Chimkent, 160012 Republic of Kazakhstan).

**Goro S.** — Post-Graduate Student, Moscow Aviation Institute (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Bejseev S.A., Naukenova A.S., Korsun O.N., et al. Improving the organization of metrological support based on methods of operation research. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2022, no. 2 (139), pp. 60–78 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2022-2-60-78>