

УДК 004.891

Оптимизация маршрутов в вариативной среде

Route optimization in a variable environment



Мордвинов В.А., к.т.н., профессор, РТУ МИРЭА E-mail: mordvin-vlad@list.ru, Москва, Россия
Mordvinov V.A., PhD., professor, RTU MIREA, E-mail: mordvin-vlad@list.ru, Moscow, Russia

Матчин В.Т., ст. преподаватель, РТУ МИРЭА E-mail: matchin.vt@gmail.com, Москва, Россия
Matchin V.T., senior lecturer, RTU MIREA, E-mail: matchin.vt@gmail.com, Moscow, Russia

Прокофьев С.Я., магистр, РТУ МИРЭА E-mail: serg.prok477@gmail.com, Москва, Россия
Prokofiev S.Ya., master, RTU MIREA, E-mail: serg.prok477@gmail.com, Moscow, Russia

Романченко А.Е., ассистент, РТУ МИРЭА E-mail: romanchenko@mirea.ru, Москва, Россия
Romanchenko A.E., assistant, RTU MIREA, E-mail: mordvin-vlad@list.ru, Moscow, Russia

Аннотация

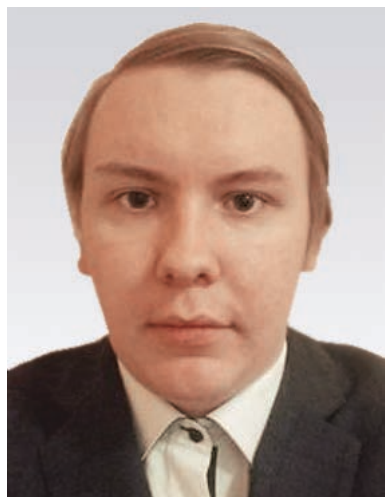
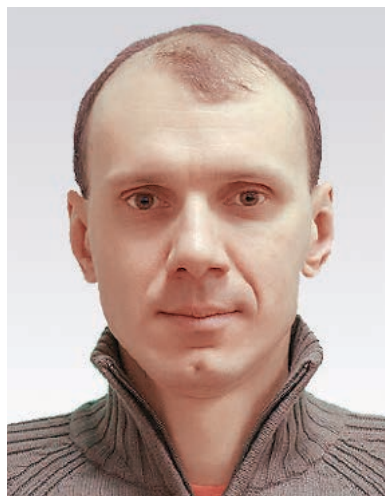
В статье исследуются методы формирования маршрутов в условиях изменения условий движения или динамической ситуации, окружающей транспортное средство. Эти условия называют условиями повышенной вариативности, а такие маршруты называют вариативными маршрутами. Вариативные маршруты возникают в мегаполисе в условиях нестационарности транспортных потоков, в условиях противодействия движению, в некоторых видах туристического сервиса, когда появляется непредсказуемый интерес к посещению объекта. Особенностью вариативных маршрутов является их непредсказуемость и отклонение от первоначального плана, они характеризуются информационной неопределенностью, и для их формирования и переформирования применяют информационные системы поддержки принятия решений. Для учета и выбора вариативных маршрутов в данной работе использован агентный подход.

Ключевые слова: движение с переменной целью, вариативный маршрут, вариативная среда, оптимизация, принятие решений.

Abstract

The article explores the methods of forming routes in conditions of changing traffic conditions or a dynamic situation surrounding the vehicle. These conditions are called conditions of increased variability, and such routes are called variable routes. Variable routes arise in a metropolis in conditions of unsteady traffic flows, in conditions of counteraction to movement, in some types of tourist services, when there is an unpredictable interest in visiting an object. A feature of variable routes is their unpredictability and deviation from the original plan, they are characterized by information uncertainty, and decision support information systems are used to form and reshape them. To account for and select alternative routes, an agent-based approach was used in this work.

Keywords: movement with a variable purpose, variable route, variable environment, optimization, decision making.



Введение

Формирование маршрутов в условиях нестабильности условий движения транспортного средства является актуальной задачей. Нестабильность условий движения обусловлена либо воздействием внешней среды, либо стохастичностью условий движения. Задача перемаршрутизации возникает также в динамической ситуации, окружающей подвижный объект. Такие условия вариативными и такое движение называют вариативным. Ситуацию с повышенной вариативностью называют вариативной ситуацией. Альтернативой является ситуация движения с неизменяющимися условиями. Маршруты с вариативным движением называют вариативными маршрутами. Подобная ситуация встречается при движении транспортного средства в мегаполисе [1, 2] при наличии пробок и заторов, а также при движении объекта с переменной целью [3].

Движение объекта с переменной целью имеет место при боевых действиях [4], когда истинная цель движения ракеты скрывается от противника и маршрут выбирается в последний момент. Движение объекта с переменной целью имеет место при боевых действиях, когда в процессе движения выясняется наличие и определенное расположение средств противоракетной обороны и возникает необходимость выбора маршрута с минимальным риском поражения. В мегаполисе это соответствует появлению пробок [5] в процессе движения и необходимости их обхода. Ситуация с вариативными траекториями движения встречается в туристических изменяющихся маршрутах. В этих случаях туристы по ходу движения формируют маршрут при появлении потребностей в осмотре новых объектов. Особенностью вариативных маршрутов является то, выбор такого маршрута невозможен с помощью прямого [6] или линейного алгоритма.

В связи с невозможностью применения запланированного фиксированного маршрута решение задачи выбора осуществляют с применением эвристических или мета эвристических [7] методов и алгоритмов. Универсальное решение получают, если для выбора маршрута применяют информационную систему поддержки принятия решений. Следует подчеркнуть, что применяют именно систему поддержки принятия решений (ИС ППР), поскольку она обладает большей гибкостью в сравнении с системой принятия решений. В данной работе исследована и разработана ИС ППР для туристических целей. Анализ аналогов систем показал, что существующие ИС ППР выбора маршрутов и оптимизации в них в основном ориентирована на курьерские задачи. Обычно это доставка курьером корреспонденции по разным маршрутам, которые он выбирает по текущей обстановке, но решает общую задачу доставку набора корреспонденции в разные географические точки.

Авторами был выбран мультиагентный алгоритм для решения данной задачи. В качестве исходной точки для исследования были использованы клиент-серверные приложения выбора маршрутов. Эти приложения оптимизируют маршруты перемещения. Можно отметить наиболее известные: Яндекс Карты [8], Aurama [9], Google Maps [10], Ponsy [11]. В качестве исходного метода обычно применяют либо алгоритм задачи коммивояжера [12], либо

алгоритм решения транспортной задачи [13]. Особенность данных методов и алгоритмов в том, что они ориентированы на стационарные условия, исключающие вариативность маршрута. Задача коммивояжера является одиночной. В ней рассматривается один движущийся объект, посещающий разные точки доставки. Оптимизация маршрута состоит в выборе оптимального критерия для одного из маршрутов [14]. Транспортная задача в сравнении с задачей коммивояжера является множественной. В ней существует несколько объектов, доставляющих грузы. В транспортной задаче существует несколько пунктов отправления и несколько пунктов доставки. Объекты доставки функционируют комплементарно [15]. Оптимизация в этом случае более сложная и часто аналитически неосуществимая. Она состоит в нахождении оптимального критерия по всем маршрутам. Кроме того, обе задачи требуют стационарных условий в процессе движения. Обе задачи исключают погрешности в условиях движения. Наличие исходной погрешности на начало движения приводит к тому, что якобы оптимальный маршрут на фактически не является оптимальным. Наличие динамической погрешности в процессе движения приводит к тому, что первоначально оптимальный маршрут становится не оптимальным. Предлагаемый авторами метод использует эвристический подход, в частности технологию много агентных систем (МАС) [5, 16]. МАС допускает вариативные маршруты. Предлагаемый авторами метод позволяет решать задачи в условиях, в которых алгоритм задачи коммивояжера или алгоритм транспортной задачи неприменимы.

Анализ типовых решений

В качестве базы исследований были использованы приложения [8-11]. Для обычной и частично вариативной маршрутизации, например, в такси, применяют систему принятия решений «Яндекс.Карты». В августе 2022 «Яндекс.Карты» добавил функцию оптимизации маршрутов, которую обычные пользователи могут бесплатно использовать для построения маршрутов с четырьмя и более точками. Обычно маршрут строится перед началом движения и задача решается решенной, о чем навигатор докладывает «маршрут построен». Это пользовательский вариант приложения, то есть для водителя.

Для диспетчеров (диспетчерский вариант) существует вариант приложения, в котором можно контролировать работу водителей или курьеров. Диспетчерский вариант является динамическим, поскольку описывает ситуацию в процессе движения. Оба варианта учитывают пробки путем ввода весов ребер в топологическую модель. Диспетчерский вариант является глобально динамическим, он охватывает всю сеть. Пользовательский вариант является локально динамическим, то есть вносит изменения на ближайший участок по ходу движения, при условии, что такая информация поступила из диспетчерского центра. Оба варианта выполняют оптимизацию до начала движения. В процессе движения они вносят коррекцию в движение, но оптимизацию не проводят. >>>

Существует технология геосервис [17], в которую входят рассмотренные выше приложения [8-11]. Геосервис Ponsy [11] предназначен для курьеров и диспетчеров. Поэтому он сложен для обычных пользователей. Для формирования маршрута необходимо ввести большее число данных по сравнению с Яндекс картами. Оптимизация не решается, а решается задача выбора рационального решения (маршрута). Это обусловлено тем, что фактически в этих решениях используют методы дискретного моделирования, в которых оптимальное решение часто заменяется рациональным, а оптимальность заменяется полезностью.

Требование к выбору туристических маршрутов

Выбор туристических маршрутов во многом схож с выбором маршрутов для бомбометания в условия насыщенной ПВО и непредсказуемых ситуаций противника. Различие состоит в том, что при бомбометании возникают точки и районы, которые надо обходить как пробки в мегаполисе, а в туристических маршрутах наоборот возникают точки и районы, которые надо посетить. Математически это одна задача, но с разными критериями. В силу сложности такой задачи нет коммерческих решений и программных продуктов для оптимизации вариативных туристических маршрутов.

Для решения с помощью ИС ППР был проведен анализ, на основе которого были выявлены несколько этапов решения, которые могут служить основой эвристического алгоритма. По мере возможности термин «туристические» исключается для того, чтобы показать универсальность выбора маршрута.

1. Сбор и накопление данных. Он включает сбор данных о возможных объектах посещения. На основе сбора создают базу данных [18], которая используется для анализа и выбора маршрутов. Особенность базы данных состоит в том, что она хранит описание объектов и пространственных ситуаций к ним.
2. Имитационное информационное моделирование. Этот этап имитирует движение на возможных маршрутах, с выделением критериев полезности.
3. Использование эвристически и мультиагентных алгоритмов. Применение эволюционных и генетических алгоритмов, алгоритмов муравьиной колонии, стайных алгоритмов помогает в выборе оптимального или рационального маршрута.
4. Введение элемента субсидиарности в формирование маршрута оптимизации. Эти алгоритмы помогают учесть динамически меняющиеся факторы, расстояние, стоимость, привлекательность.
5. Использование теории предпочтений. Каждая группа туристов формируется на основе тематики и предпочтений. Теория предпочтений учитывает качественные и количественные факторы в единой системе оценки.
6. Алгоритмизация выбора маршрута.

Дополнительно к этапам были проанализированы методы коррекции и оптимизации. Для оптимизации можно использовать принцип Парето. Этот термин существует официально, хотя официально Парето такой

принцип не предлагал, а обнаружил статистическую закономерность (1987), которая послужила основанием для Джозефа Джурана объявить эту закономерность принципом Парето. Метод имеет две основные трактовки. Первая трактовка связана с фильтрацией результата: «20 % сотрудников (или альтернатив принятия решений) дают 80 % результата, а остальные 80 % сотрудников (или альтернатив принятия решений) дают 20 % результата».

Вторая трактовка связана с работой уже выбранных альтернатив. Множеством альтернатив, оптимальных в смысле Парето таково, что это такая совокупность альтернатив (состояний), при котором ни один показатель совокупности альтернатив в определенных границах не может быть улучшен без ухудшения другого показателя. Часто про границы забывают, а на самом деле ценность второй трактовки в том, что она задает границы допустимого изменения, которое не ухудшает общее состояние системы или совокупности альтернатив. «Всякое изменение, которое не приносит ухудшение, а приносит пользу, является допустимым».

Принципе оптимальности Парето позволяет сравнивать альтернативы по нескольким критериям одновременно. Первый Принцип Парето помогает выделить значимые и исключить малозначащие альтернативы. Вторым принцип Парето дает возможность изменений без ухудшения рационального или оптимального решения.

Метод топологической точки используют при многокритериальной дискретной оптимизации. Он включает определение точки в топологическом пространстве, которая имеет наименьшую сумму весов (при негативном критерии) относительно альтернатив, обозначенных точками в топологическом пространстве. Альтернативы оцениваются относительно топологической точки и по оценкам их упорядочивают. Этот метод позволяет найти рациональное решение, если оптимальное найти сложно.

Метод квазиоптимального вектора является графическим аналогом метода топологической точки. Параметры точки используют для построения вектора. Вектор строится как комбинация значений параметров альтернатив. С помощью этой модели можно проводить сравнение альтернатив, выбор оптимального вектора и оценивать отношение альтернатив по отношению к оптимальному вектору. Использование данных методов помогает улучшить выбор альтернативных маршрутов и выбирать туристические маршруты.

Применение муравьиного алгоритма

Для выбора в вариативных условиях применяют мультиагентные алгоритмы. Управление движением такси является слабым аналогом потому, что оно в ходе движения дает детерминированные рекомендации. Реальный алгоритм МАС содержит элемент случайного выбора.

Широко пишут о модели «муравьиного алгоритма» и даже иногда приводят формулу Dorigo [19, 20]. Как справедливо отмечено в [14], эта формула не учитывает все особенности алгоритма и является одним из правил, в дополнение к которому надо вводить свои правила применительно к конкретной задаче и конкретным условиям.



В современном понимании «муравьиный алгоритм» или ACO (*Ant Colony Optimization*) относится к интеллектуальным алгоритмам и методам [14]. Он основан на системе эвристических правил. Общая сущность его в том, что он использует два алгоритма – локальный и групповой [21]. С современных позиций «муравьиная колония» есть саморазвивающаяся система, направленная на выживание и развитие. Муравей в терминах моделирования – это агент. Множество муравьев есть мультиагентная система.

Групповой алгоритм использует свойство муравьев наносить феромон на землю для обозначения маршрута при доставке пищи в муравейник. Энтомолог Пьер-Поль Грасс ввел понятие «стигмергия» как обозначение особого вида коммуникации. Эта коммуникация основана на том, что «субъекты стимулируются достигнутыми результатами». Это понятие используют для косвенной, паралингвистической [22] формы коммуникации, Стигмергия реализуется в ACO посредством феромона, который еще имеет свойство испаряться с течением времени. Муравьи чувствуют феромон и следуют тем маршрутом, в котором сравнительно выше концентрация феромона. Этот механизм служит основой глобальной оптимизации при выборе маршрута.

Был проделан ряд экспериментов с реальными муравьями для исследования и описания их как агентов [23, 24]. Были выявлены три основные тенденции: агенты (муравьи) выбирают более короткий путь между источником пищи и колонией, агенты с течением времени выбирают путь к более богатому источнику пищи, агенты следуют по маршруту с более высоким содержанием феромона.

Еще раз следует остановиться на недостатках модели Дориго. Он дает формулу описания агента, единую для всех агентов. В реальности у муравьев и пчел существуют группы агентов: агенты разведчики; агенты фуражиры (занимающиеся доставкой пищи – основная группа); агенты строители колонии; агенты, опекающие матку. Это минимум четыре группы, которые имеют разные модели поведения и алгоритмы поведения. Дориго дает одну формулу для разведчиков и фуражиров, но не вводит различие при движении к источнику пищи и обратно. Поэтому его формула это всего лишь основа для правила движения и построения более сложного эвристического алгоритма выбора маршрута. Но как модель агента она может быть использован при решении прикладных задач и развитии алгоритма. Агенты в МАС имеют свойство субсидиарности [25], которое обуславливает возможность случайного поведения. Дориго об этом не писал. Заслуга Дориго в том, что он ввел параметр «вероятность выбора маршрута» и правило «перехода между маршрутами».

Разработка модели выбора маршрута

В простом алгоритме ACO применяют две модели агентов, называемые «агент вперед» и «агент назад». Вперед-назад выбирают относительно колонии. Именно эти модели были использованы при выборе алгоритма оптимизации вариативных маршрутов. В дополнении к алгоритму муравьев был введен новый вид стигмер-

гии «новый важный интерес». Он играет роль феромона, но является более «важным», поскольку заставляет агента радикально менять поведение. Проведенные исследования послужили основой разработки, клиент-серверного приложения.

На этой основе в Российском Технологическом университете на кафедре (ИППО) инструментального и прикладного программного обеспечения было разработано программное обеспечение для оптимизации вариативных маршрутов. Дополнение разработанного сервиса по сравнению с сервисами [8–11] является возможностью выбора транспортных средств туристом.

Эвристический алгоритм выбора строился на правилах:

1. Среда движения агента есть транспортный граф.
2. Агент занимает узел в сети, с которого выполняет локальный поиск.
3. Агент обладает субсидиарностью.
4. Движение агента происходит с начального узла i , который отождествляют с колонией.
5. Начальное движение происходит от колонии.
6. Стратегическая задача агента состоит в необходимости обойти все «интересующие точки».
7. Промежуточное движение осуществляется от вершины i к вершине j . Точка i называется «точка поиска». Случайная точка j называется «точка перебора». Выбранная точка j называется «точка выбора».
8. Агент осуществляет локальный поиск, при котором учитывает вес ребра $i-j$ и длину ребра.
9. Вес ребра определяется феромоном («обычный интерес») и «новый важный интерес» или отсутствием феромона (интереса).
10. «Обычный интерес» мотивирует штатное движение.
11. «Новый важный интерес» мотивирует вариативное движение.
12. После локального поиска агент двигается из i в j .
13. После достижения интересующей точки, агент двигается к следующей интересующей точке.
14. Агент ощущает феромоны (информацию о точках возможного посещения) через ребра (возможные маршруты движения).
15. Агент не обладает полной информацией о маршрутах поэтому использует субсидиарное поведение, которое является стохастическим и не мотивировано.
16. В случае обхода всех интересующих точек маршрут заканчивается.

При разработке алгоритма были учтены методы [8–11] и составлен оригинальный алгоритм, описанный выше в 15 правилах.

Была заложена возможность масштабирования алгоритма для разных типов устройств типа смартфоны. Была рассчитана вычислительная и объемная сложность алгоритма. Для оценки типа маршрутов были введены понятия: базовый маршрут, начальный маршрут, промежуточный маршрут, вариативный маршрут. Вариативным маршрутом назвался маршрут, не предусмотренный начальным планом движения. В качестве основной информации были использованы.

- Задавался граф интересующих точек с промежуточными точками (среда движения). >>>

- Задавались интересующие точки обычного посещения туристами (феромоны).
- Задавались длины ребер между всеми точками возможных маршрутов.
- Задавался начальный базовый маршрут по интересующим точкам.
- Задавался уровень «Новый важный интерес» как феромон, который существенно превосходит феромон обычных интересующих точек.
- Производилась оценка начального маршрута с учетом параметров: транспортное средство, время работы транспортного средства, обязательности посещения «интересующих точек».
- По мере движения производится оценка промежуточного маршрута с учетом возможного появления «Нового важного интереса».
- При появлении «Нового важного интереса» производилась перестройка маршрута, которая включала выбор новых транспортных средств и оптимизацию с новыми параметрами.
- Построение маршрута осуществляется с выводом на экран общего времени пути, расстояния и расчеты этих данных по частям маршрута.

В ходе проектирования и моделирования был создан специальный интерфейс для пользователей. Этот интерфейс давал возможность настраивать выбранный маршрут и менять текущий маршрут.

Интерфейс обеспечивает когнитивную поддержку путем создания и использования визуальной модели. Маршрут показан на визуальной модели на компьютере или на смартфоне. Это мобильное приложение и позволяет туристу оперативно отслеживать свое местонахождение и свой маршрут и менять его согласно предпочтениям. На рис.1 показан визуальная модель с «интересующими точками». Слева показан интерфейс пользователя. За основы были взяты карты Яндекс, на которые наложено оригинальное программное обеспечение с оригинальным интерфейсом.

Красным цветом выделена начальная точка, зеленым цветом обозначена условно конечная точка маршрута. Черным цветом обозначены интересующие точки. Маршрут между ними может меняться в ходе движения. Требования к приложению были разработаны с помощью технологии FURPS+ [26]. Разработанное приложение отличается функциональностью, удобством, надежностью и производительностью. Оно позволяет выбирать несколько точек на графе (карте); разделять маршрут на несколько частей; проводить постройку маршрута.

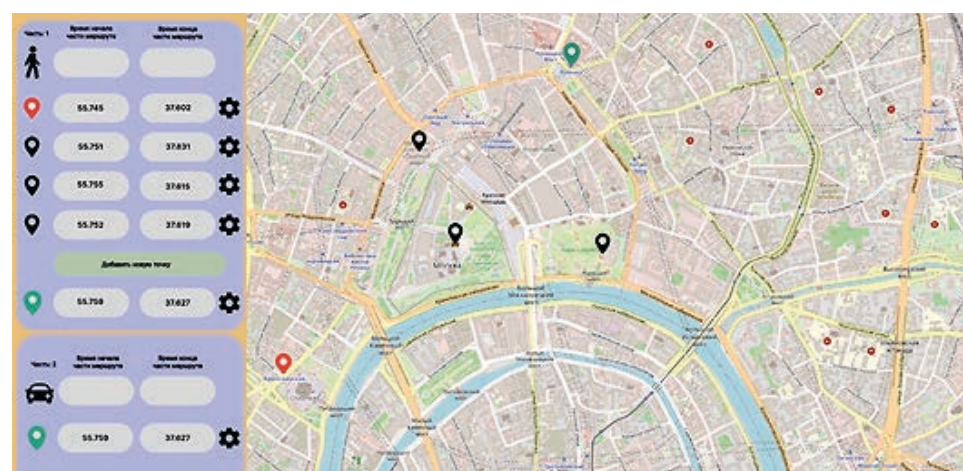


Рисунок 1. Визуальная модель, помогающая выбирать маршруты

Приложение обеспечивает резервное копирование; установлена частота сбоев (<раз в месяц). Одновременное количество пользователей достигает 300 человек.

Узким местом приложения является использование карт Яндекса. Эти карты обновляются недостаточно часто. Поэтому при использовании своих карт и своей геоинформационной системы эффективность системы возрастает.

Заключение

Данная система в сфере транспорта применима для оптимизации перевозок в мегаполисе и для мульти модальных перевозок. Система в сфере транспорта применима для оптимизации перевозок при возникновении непредвиденных обстоятельств. Новизной работы является создание вариативного информационного пространства и его использование для маршрутизации. Ее особенностью является возможность подключения когнитивного пространства субъекта к маршрутизации. Она применима при перестройке маршрутов в разных отраслях. Данная система применима при оперативном выборе маршрутов БПЛА. Данная система применима в сфере образования при обучении студентов транспортных вузов и вузов картографического профиля. Данная система применима в сфере образования при обучении студентов экономических специальностей при исследовании решения транспортной задачи и задачи коммивояжера. Она позволяет получать визуальные решения и обсуждать возможные варианты решения этих задач при возникновении проблем с движением. По результатам испытаний на это Приложение получен сертификат Лиги Преподавателей высшей школы. ■

Список литературы

1. Кужелев П.Д. Принципы управления транспортом мегаполиса // Наука и технологии железных дорог. – 2017. Т.1. – 1(1). – С.27-33.
2. Рогов И.Е. Органический и ситуационный анализ при управлении транспортом мегаполиса // Наука и технологии железных дорог. 2022. Т. 6. №1 (21). – С.25-33.
3. Козлов А.В. Многоцелевое управление транспортом мегаполиса// Наука и технологии железных дорог. – 2018. Т.2. – 4(8). – С.40-47.
4. Цветков В.Я., Шорыгин С.М. Динамическая информационная ситуация преодоления противоракетной обороны // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014 – № 3 (4). – С.85-100.
5. Рогов И. Е. Применение мультиагентных систем в управлении транспортом мегаполиса // Наука и технологии железных дорог. – 2020. Т.4. – 1(13). – С.26-36.
6. Щенников А.Е. Модели прямых алгоритмов // Славянский форум. – 2017. -4(18). – С.103-109.
7. Цветков В.Я., Козлов А.В. Алгоритм субсидиарной метаэвристики // Образовательные ресурсы и технологии. – 2022. – № 4 (41). – С.87-95.
8. Яндекс. Карты: официальный сайт. – URL: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 20.05.23). – Текст: электронный.
9. Aurama mini: официальный сайт. – URL: <https://mini.aurama.ru/> (дата обращения: 10.05.23). – Текст: электронный.
10. Google Maps: официальный сайт. – URL: <https://developers.google.com/maps/documentation?hl=en> (дата обращения: 27.05.23). – Текст: электронный.
11. Poncy: официальный сайт. – URL: <https://poncy.su/> (дата обращения: 10.05.23). – Текст: электронный.
12. Калиберда Е. А. и др. «Муравьиный» алгоритм в решении задачи коммивояжера //Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2020. – Т. 7. – №. 2. – С.10-17.
13. Tsvetkov V. Ya. Trade-off transportation problem. Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2019. Т. 3. № 435. С.109-113. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.75>
14. Карпова И. П. Об одном биоинспирированном подходе к ориентации роботов, или настоящий «муравьиный» алгоритм //Управление большими системами: сборник трудов. – 2022. – №. 96. – С. 69-117.
15. Богоутдинов Б.Б., Цветков В.Я. Применение модели комплементарных ресурсов в инвестиционной деятельности // Вестник Мордовского университета. – 2014. – Т. 24. № 4. – С.103-116.
16. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Применение мультиагентных систем в интеллектуальных логистических системах. // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – №6. – С.107-109.
17. Павлов А.И. Геосервис как направление информатики и геоинформатики // Славянский форум. -2020. – 2(28). -С.7-14.
18. Цветков В.Я. Проектирование структур данных и базы данных – М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 1997. – 90 с.
19. Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V. An Investigation of some Properties of an " Ant Algorithm " //Ppsn. – 1992. – Т. 92. – №. 1992
20. Dorigo M. et al. Evolving self-organizing behaviors for a swarm-bot //Autonomous Robots. – 2004. – Т. 17. – №. 2-3. – С. 223-245.
21. Козлов А. В. Двух алгоритмическая система управления подвижными объектами // Наука и технологии железных дорог. – 2020. Т.4. – 1(13). – С.37-45.
22. Цветков В.Я. Паралингвистические информационные единицы в образовании// Перспективы науки и образования. – 2013. – 4(4). – С.30-38.
23. Deneubourg J. L. et al. Error, communication and learning in ant societies //European Journal of Operational Research. – 1987. – Т. 30. – №. 2. – С. 168-172.
24. Goss S. et al. Self-organized shortcuts in the Argentine ant //Naturwissenschaften. – 1989. – Т. 76. – №. 12. – С. 579-581.
25. Цветков В.Я. Применение принципа субсидиарности в информационной экономике // Финансовый бизнес. -2012. – №6. – С.40-43.
26. «Требования к системе: классификация FURPS+»: официальный сайт. – URL: <https://sysana.wordpress.com/2010/09/16/furps/> (дата обращения: 18.08.23).