

УДК: 333.24 65.0 004.08

Управление дискретными транспортными потоками

Discrete traffic management

Козлов А.В., Зам. директора Физико-технологического института, Московский технологический университет (МИРЭА), E-mail: a_kozlov@mirea.ru, Москва, Россия

Kozlov A.V., Deputy Director of the Physics - Technological Institute, Moscow Technological University (MIREA), E-mail: a_kozlov@mirea.ru, Moscow, Russia

Аннотация



Статья посвящена исследованию динамике транспортных проблем. Объектом исследования являются потоки подвижных объектов. Рассмотрены виды моделирования дискретных потоков. Показано различие между грузопотоками и потоками транспортных средств. Для дискретных потоков вводится элемент потока - транспортная единица потока. Дан анализ развития методов описания и моделирования транспортных потоков. Показаны условия функционирования дискретного потока. Описаны три уровня транспортных потоков: дискретные, дискретно -непрерывные, генерализованные. Описаны проблемы моделирования транспортных потоков. Дана систематика развития методов управления потоками. Раскрыто содержание комплементарности и рассогласования дискретных потоков. Раскрыто содержание диссипации транспортных потоков. Раскрывается явление и содержание модели потоковая кластеризация. Описаны первый и второй принцип Вардропа как правила выбора поведения для единицы потока. Показано различие между топологической и волновой структурой потока. Раскрывается содержание понятия векторное поле транспортного потока.

Ключевые слова: транспорт, дискретные потоки, транспортная единица, потоковая кластеризация, модель потока, оптимизация маршрута.

Abstract

The article is devoted to the study of the dynamics of transport problems. The object of study is the flow of moving objects. Types of modeling of discrete flows are considered. The difference between cargo flows and vehicle flows is shown. For discrete flows, a flow element is introduced - a transport unit of flow. An analysis is given of the development of methods for describing and modeling traffic flows. The conditions for the functioning of a discrete flow are shown. Three levels of transport flows are described: discrete, discrete-continuous, generalized. The problems of modeling traffic flows are described. A taxonomy for the development of flow control methods is given. The content of complementarity and mismatch of discrete flows is revealed. The content of dissipation of transport flows is revealed. The phenomenon and content of the stream clustering model is revealed. The first and second Wardrop principles are described as rules for choosing behavior for a flow unit. The difference between the topological and wave structure of the flow is shown. The content of the concept of vector field of traffic flow is revealed.

Keywords: transport, discrete flows, transport unit, flow clustering, flow model, route optimization.



Введение

Дискретные потоки образуются либо стихийно, либо целенаправленно. Дискретным потоком [1-3] называют совокупность объектов, которые обладают возможностью комPLEMENTАРНОГО и РАССОГЛАСОВАННОГО перемещения. Стихийный поток возникает вследствие ограничений на условия движения, например, рельсы, ограждения, границы улиц, светофоры. Целенаправленный дискретный поток образуется при наличии цели [4]. Например, движение муравьев в поисках пищи приводит к созданию дискретного потока от муравейника к источнику пищи [5]. В этом случае работают групповые алгоритмы. Таким образом, ограничения уплотняют движение и превращают свободное движение в ограниченный поток.

Наличие цели и целевое движение создает поток, мотивированный целью. В реальности дискретные потоки не существуют изолированно, а сосуществуют друг с другом. В мегаполисе существуют потоки городского транспорта. Включая городские железные дороги. В мегаполисе существуют потоки частных автотранспортных средств, которые имеют тенденции в утреннее время иметь направление в центр, а после окончания рабочего дня эти потоки направлены из города. Дискретные потоки существуют в природе и обществе. Примером дискретного потока является пассажиропоток. Движение в потоке более эффективно, чем свободное движение, так как уменьшает диссипацию. Групповой характеристикой потока является пропускная способность, однако она связана не столько с потоком, сколько с возможностями среды или канала протекания потока. Многообразие применения дискретных потоков делает актуальным их исследование.

Специфика дискретных потоков

По содержательности транспортные потоки делят на потоки грузов и потоки транспортных средств. В зависимости от уровня детализации транспортные потоки делят на три вида [6]: микроскопический уровень (модели следования отдельных автомобилей, включая смену полосы движения), мезоскопический уровень (распределение интервалов движения) макроскопический уровень (например, фундаментальные диаграммы и модели транспортных волн). Для микропотока допустимо понятие единица транспортного потока. Это может быть единица груза или подвижный объект.

Примером микроскопических транспортных потоков является движение единиц транспорта. Такое движение характеризуется неоднородностью, пробками, замедлением скорости и авариями на дорогах. Для микропотока используют дискретную математику [7] и в отдельных случаях целочисленные координаты [8]. Математическое описание и модели таких потоков строят с использованием сумм и вероятностных характеристик. Для таких потоков имеется характеристика индивидуальный и групповой маршрут.

Если рассматривать укрупненно движение городского транспорта в мегаполисе приходим к мезапотоку.

Для мезапотока можно использовать модель сложной системы [9]. Для этого вида потоков можно использовать системный анализ и пренебрегать особенностями единичных элементов потока. Математическое описание и модели таких потоков строят с использованием интегралов и векторных характеристик [10]. Для таких потоков используют понятие групповой маршрут.

Для протекания дискретных потоков необходима соответствующая среда. Такой средой является транспортная сеть, которая моделируется с помощью графов. При анализе перевозок дискретные потоки могут быть описаны дискретными алгоритмическими системами. Дискретные потоки изучает дискретная математика и прикладная информатика [11].

Моделирование дискретных потоков

Математические модели анализа транспортных потоков весьма разнообразны. Их можно разделить: по задачам, математическому формализму, по степени дискретности или непрерывности, по степени детализации или генерализации. Сложно дать полную классификацию моделей транспортных потоков. Функционально выделяют четыре типа моделей потоков: оптимизационные; прогнозные модели; трендовые; имитационные.

При управлении транспортными потоками важным является обоснование метода моделирования [12, 13]. Выбор модели в первую очередь зависит от характеристик потока и управленческих задач. Выбор модели также зависит от имеющихся информационных ресурсов [14, 15]. От выбора модели зависит выбор метода моделирования. Моделирование дискретных потоков можно разделить на информационное, имитационное, сценарное, эвристическое и гидродинамическое.

С 50-х годов не прекращаются попытки использовать гидродинамические модели протекания жидкости для моделирования дискретных транспортных потоков [16]. Для некоторых мезо потоков и для некоторых ситуаций эти математические приемы в упрощенной форме. Гидродинамическая модель принципиально не может моделировать пробки и аварии. Поэтому она может использоваться для описания усредненных характеристик потоков.

В настоящее время всё чаще используют комплексное моделирование, которое использует не один ключевой признак, а их сочетание. Микроскопическое моделирование использует систему правил, которая включает мотивацию и поведение отдельного подвижного объекта и правила его взаимодействия с подвижными объектами и ситуациями прерывания потока.

Метод клеточных автоматов является альтернативой гидродинамическому методу. Его можно использовать для микропотоков. Он требует разбиения среды движения транспорта на ячейки. При моделировании каждая из ячеек находится в свободном или занятом состоянии. Такой подход позволяет моделировать эффект перколяции как транспортный коллапс. >>>

К методам микро моделирования дискретных потоков относ дискретно-событийный метод. Он использует операционный подход, который представляет дискретный поток как последовательность операций [6]. В таких моделях используют либо заявки, либо завершение событий.

Наиболее интересным является метод агентов или мультиагентного моделирования. Агент можно рассматривать как информационную [17] или интеллектуальную единицу, которая наделена набором правил к действию. Агент есть микромодель или независимый автономный объект, который действует согласно установленному набору правил и взаимодействующий с другими агентами [18]. Простой агент действует по простому алгоритму взаимодействия. Делиберативный агент имеет память и интеллект и способен вырабатывать правила поведения. Одиночный агент ничего не решает. Совокупность агентов решает задачу и создает эмерджентность. Совокупность агентов решает в том числе транспортные задачи, которые чаще всего связаны с оптимизацией маршрута передвижения. Примером агента в природе является муравей и пчела, которые решают транспортные проблемы. Примером агента в мегаполисе является водитель такси. Метод агентов помогает моделировать дискретные транспортные потоки. Первые исследования транспортных потоков представляют собой эмпирические исследования, которые в значительной степени опирались на статистику, то есть на макропоказатели.

Управление потоками

В 1960-х годах были введены новые меры дорожного движения [16]. Во-первых, радиолокационные устройства, такие как ручные или установленные на транспортных средствах радиолокационные измерители, использовались для непосредственного измерения скорости транспортного средства путем расчета разницы в частоте между излучаемой радиолокационной волной и волной, отраженной встречным транспортным средством. Этот подход может быть наиболее простым методом наблюдения за скоростью транспортного средства. Во-вторых, петлевые детекторы постепенно стали доминирующими датчиками в управлении транспортом

Двойные петлевые детекторы могут измерять скорость транспортного потока, занятость времени и скорость транспортного средства, что позволяет реконструировать ключевые corteжи транспортного потока на макроэкономическом уровне. Таким образом, петлевые детекторы являются важным элементом для управления дорожным движением, особенно в ИТС. Однако петлевые детекторы могут измерять только транспортный поток, проходящий по отдельной поперечной линии дороги.

Развитие информационных технологий было сопряжено с появлением придорожных видеокамер. Это создало системы видеомониторинга транспортных потоков. Эти системы стали новыми инструментами измерения и управления транспортными потоками. Первоначально видеокамеры использовались для подсчета прибытия транспортных средств и служили детекторами виртуальных петель [16].

Когда качество изображения видеокамер и вычислительные возможности стали более высокими, камеры стали одновременно отслеживать подробные движения нескольких транспортных средств. В настоящее время камеры высокого разрешения устанавливают на высоких зданиях, вертолетах или дронах. Их в управлении потоками используют для захвата 2D-движений отдельных транспортных средств с высоким разрешением с высоты птичьего полета. Временные ряды положений транспортных средств записывают как непрерывные траектории (маршруты) транспортных средств (мезоуровень). Такие ряды, представляют почти 100% дорожных условий и информацию о движении транспортного средства. Данные о траекториях (маршрутах) значительно ускоряют исследования транспортных потоков, поскольку дают полную и высокоточную информацию о поведении отдельных участников дорожного движения на микроскопическом уровне в сочетании с мезоуровнем макроуровнем.

В настоящее время для управления потоками применяют интегрированные системы [19] и спутниковые технологии [20]. Транспортные средства, оснащенные специальными устройствами ГЛОНАСС, GPS на всех видах транспорта используют для мониторинга дорожного движения и управления на этой основе. Эти устройства являются обязательными для цифровой железной дороги и транспортных кибер-физических систем.

Такие транспортные средства, называемые транспортными средствами-зондами или плавучими объектами, передвигаются по дорожной сети и постоянно загружают информацию о своем статусе (например, широту, долготу, мгновенную скорость и направление движения) в центры управления движением (ЦУП) через короткие промежутки времени через мобильную связь.

Дискретные транспортные потоки являются пространственными потоками. Они требуют пространственного управления [21] и применения методов геоинформатики. Современное управление транспортом в условиях больших данных [22, 23] является интервальным [24]. При анализе пространственных потоков используют ГИС. Для применения ГИС необходимо создавать специальные интегрированные модели. Для управления потоками с использованием интеллектуальных систем необходимо создание среды поддержки [25]. Такой средой является ситуационный центр [26] дорожного движения, центр управления движением. В свою очередь, для пространственного управления средой поддержки является координатная среда.

При использовании автоматизированных информационных систем управления необходимо применять информационное моделирование. При использовании ГИС для управления с потоками необходимо применять геоинформационное моделирование [27]. Геоинформационное моделирование и геоинформационные технологии служат основой поддержки принятия решений [28] при управлении дискретными пространственными потоками. При анализе дискретных потоков, которые состоят из дискретных объектов потока, целесообразно применять методологию информационных единиц [38]. >>>

Для контроля дискретных потоков в пространстве необходимо применять геоинформационный мониторинг. При управлении дискретными потоками необходимо определять и анализировать состояние информационных ситуаций, в которых находятся элементы потока. Соответственно, в этих случаях необходимо применять ситуационное моделирование [30]. В ходе исследования дискретных потоков возможно накопление опыта и формирование пространственных знаний [31]. Пространственные знания накапливают опыт управления и повышают эффективность движения.

Комплементарность и рассогласованность дискретных потоков

Дискретные потоки изучает теория управления подвижными объектами. Наряду с дискретными потоками существуют непрерывные потоки, например, в нефтепроводе и газопроводе. В транспортном дискретном потоке необходимо ввести понятие использовать понятие единица потока. Такой единицей является отдельное транспортное средство. Единица существует только для микропотока. В моделировании ее аналогом является агент.

Для потока существует групповые и частные характеристики. Групповые характеристики понятие групповая скорость потока V_F и интенсивность потока, а также пропускная способность транспортной среды, предельно допустимая скорость потока. Индивидуальные характеристики скорость V_U ; единицы потока максимально допустимая скорость единицы потока.

Движение в дискретном потоке связано с понятиями комплементарности и рассогласованности. Комплементарность [32] соответствует синхронности и отражает согласованность движения. Примером является движение колонны боевой техники и движение вагонов поезда. Комплементарность является групповой характеристикой. Полная комплементарность имеет место, когда групповая скорость потока и индивидуальные строго скорости равны. Разброс скоростей практически отсутствует. В обычном дорожном движении существуют вариации дистанций и скоростей между единицами потока. Они на групповую скорость не влияют при отсутствии аварий и пробок. Частичная комплементарность имеет место, когда групповая скорость потока равна средней скорости единиц потока, но существует разброс между скоростями единиц потока и значения индивидуальных скоростей отличаются от групповой скорости. Рассогласование движения обычно снижает групповую скорость. Это явление называют диссипацией потока. Если групповая скорость снижается не существенно, не более 10–15 % от рекомендованной, то имеет место частичная комплементарность.

Рассогласованность [33] в потоке отражает наличие существенного разброса скоростей единиц потока, которое приводит в значительной диссипации движения. Большая рассогласованность может приводить к значительному снижению скорости и даже к остановке движения.

Дискретные транспортные потоки характеризует сочетание группового и индивидуального движения. Полностью синхронного движения в дискретных потоках отсутствует. Дискретные потоки описывают разными алгоритмами. Основная причина в отсутствии строгой теории дискретных потоков. Другая причина в стохастичности движения, которое обуславливает и человеческий фактор.

Комплементарность используют как свойство и отношение. Оно относится к системе и к элементам системы. Для динамических систем это свойство согласованности процессов. Для потоков это свойство согласованного движения в потоке. Для элементов комплементарность согласованных действий с другими элементами. Например, объезд аварийного участка без создания новой аварии.

Рассогласованность имеет разные степени: допустимость, негативность и недопустимость. Допустимость означает независимое движение единиц потока, которое не нарушает групповых характеристик потока. Негативность означает независимое движение единиц потока, которое нарушает групповые характеристики потока и ведет к его диссипации. Не допустимость означает независимое движение единиц потока, которое прерывает движение потока и ведет к его остановке.

Внутри потока могут возникать подвижные группы. Эти подвижные группы можно рассматривать как подвижные кластеры. Они обусловлены внешними и внутренними причинами. Внешние причины – сигналы дорожного движения, которые формируют группу перед светофором. Внутренние причины: низкоскоростное транспортное средство, тормозящее группу, модель «умный водитель», «следование за лидером» [16]: Рассогласованность потока может быть обусловлена индивидуальным поведением транспортного средства и выбором неправильной стратегии движения.

Поведение единиц транспортной сети в рамках мезо и макро уровня были сформулированы Вардропом [34], который предложил две возможные информационные ситуации движения.

- 1) Единицы сети независимо выбирают маршруты следования, соответствующие их индивидуальным частным критериям, например минимальным транспортным расходам или минимальному времени следования. Данный принцип интерпретируют как пользовательская оптимизация (*user optimization*)
- 2) Единицы сети выбирают маршруты на основе из минимизации общих транспортных расходов в сети. Этот принцип называют системной оптимизацией (*system optimization*).

В области управления приведенные индивидуальные принципы называют первым и вторым принципом Вардропа [34].

Основные свойства дискретных потоков

Необходимо разделять среду функционирования потока и поток. Если дискретный поток находится в фиксированной структуре, например структура мегаполиса, >>>

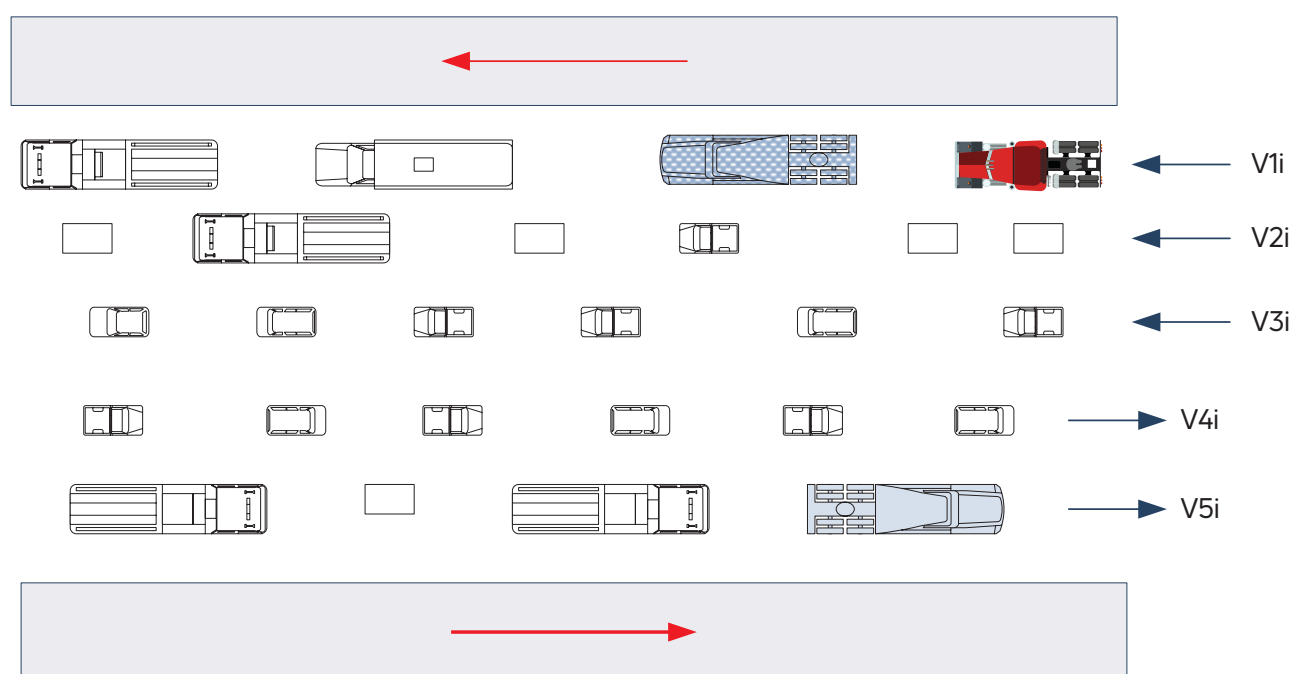


Рисунок 1. Дискретный поток транспортных средств

то он обладает свойствами сложной технологической системы и свойством саморазвивающейся системы. Свойства такого дискретного потока делят на общие и частные. Общие свойства характеризуют поток в целом: системность, целостность, интенсивность, предельность, диссипация, комплементарность, структурность, дискретность, непрерывность, кластерность, вектор потока (R_f), векторное поле.

Структура среды всегда жесткая (улицы мегаполиса, светофоры, знаки дорожного движения) топологическая. Структура потока мягкая (волновая, продольные волны), переменные маршруты и само оптимизирующиеся маршруты. Волновая структура связана с уплотнением и разрежением потока в направлении его движения. Она напоминает волны упругости. Кластерность означает наличие групп внутри потока. Например, такая группа образуется перед светофором. Дискретность означает наличие единиц потока. Дискретные транспортные потоки состоят из мобильных объектов или элементарных объектов. Элементом дискретного потока является транспортная единица, которая в рамках данного потока не делима.

Транспортные единицы ($e_1, e_2, \dots, e_N$) перемещаются и взаимодействуют между собой. Между ними существуют отношения, например, в виде дистанции между соседними объектами. Для различия отметим, что вагоны поезда жестко связаны. Между ними существует связь, например, между вагонами поезда. Вектора перемещения транспортных единиц образуют векторное поле. На рис.1 показано векторное поле и дискретный поток.

Рисунок 1 описывает двухстороннее пяти полосное движение, например по кольцевой дороге. На одной стороне движения выделено три полосы. Движение в обратном направлении имеет две полосы. Каждая полоса движения создает группу. Для каждой полосы движения существует своя групповая скорость. Традиционно на левой полосе движение происходит с большей скоростью. На одной стороне для полос существуют скорости $V_3 > V_2 > V_1$. На другой стороне $V_4 > V_5$ (рис.1).

Заключение

В настоящее время разделяют уровни наблюдения дискретных потоков: микроскопический уровень (собственно дискретный), мезоскопический уровень (дискретно-непрерывный) и макроскопический уровень (генерализованный и обобщенный). Однако в управлении потоками используют данные наблюдения о всех трех уровнях для управления дискретными потоками на первых двух уровнях. На дискретном уровне анализируют аварии и пробки. На дискретно-непрерывном уровне контролируют объемы перевозок и интенсивность движения. На этом уровне осуществляют управление перевозками. На генерализованном уровне анализируют стратегические показатели и осуществляют стратегическое управление, включая управление дорожным развитием. Можно констатировать, что многочисленные модели гидродинамики и непрерывных потоков не применимы в полной мере для описания и управления дискретными потоками. Дискретные потоки являются специфическими слабосвязанными системами систем, в которых элементарные системы взаимодействуют на основе мягких отношений, а не на основе жестких связей. Примером жестких связей является состав с соединенными вагонами. Примером мягких отношений является движение не связанных автомобилей по трассе. Мягкие отношения создают свойство субсидиарности. Субсидиарность в небольших пределах повышает производительность и делает эти потоки саморазвивающимися системами. Дискретные потоки являются эффективными средством перевозок при наличии помех и нестабильной внешней среды. Дискретные потоки также характеризует групповая сложность, которая меняется в зависимости от внешних условий. Она определяется сложностью взаимодействия элементов потока между собой и внешней средой. Дискретные потоки обеспечивают адаптивность к изменениям внешней среды и решают задачи дискретной оптимизации при агентом моделировании. Теория дискретных потоков окончательно не сформирована и требуют развития. ■



Список литературы

1. Tsvetkov V.Ya. Discrete modeling in the information field // Славянский форум. 2023, 1(39). С.177-182.
2. Рогов И.Е. Моделирование и дискретная оптимизация – Saarbruken. LAP Lambert Academic Publisng, 2020. –113 с.
3. Господинов С.Г. Дискретное моделирование. – Saarbruken, 2023. – 149 с.
4. Рогов И.Е. Моделирование транспортных потоков // Наука и технологии железных дорог. – 2019. Т.3. – 3(11). – с.26-38.
5. Елсуков П.Ю. Параметрическая модель муравьиного алгоритма // Славянский форум. -2018. – 2(20). – с.21-27.
6. Li L. et al. Trajectory data-based traffic flow studies: A revisit //Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2020. – Т. 114. – С. 225-240.
7. Aigner M. Discrete mathematics. – American Mathematical Society, 2023.
8. Tsvetkov V. Ya. Integer Coordinates as an Nanotechnological Instrument // Nanotechnology Research and Practice. – 2014, 4(4), pp. 230-236.
8. Цветков В.Я. Теория систем. – М.: МАКС Пресс, 2018. – 88 с.
10. Козлов А.В. Применение методов геоинформатики для исследования дискретных потоков // Вектор ГеоНаук. 2022. Т. 5. № 2. С. 45-52.
11. Поляков А.А., Цветков В.Я. Прикладная информатика. – М.: Янус- К, 2002. – 392 с.
12. Якимов М., Арепьева А. Транспортное планирование: Особенности моделирования транспортных потоков в крупных российских городах. – Litres, 2022.
13. Недяк А.В., Рудзейт О.Ю., Зайнетдинов А. Р. Классификация методов моделирования транспортных потоков //Вестник евразийской науки. – 2019. – Т. 11. – №. 6. – С. 78.
14. Цветков В.Я. Информационные модели и информационные ресурсы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – №3. – С.85-91.
15. Соловьев И.В., Цветков В.Я. О содержании и взаимосвязях категорий «информация», «информационные ресурсы», «знания» // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2011. – №6 (48) – С.11-21.
16. Гасников А. и др. (ред.). Введение в математическое моделирование транспортных потоков. – Litres, 2022.
17. Цветков В. Я. Семантика информационных единиц // Успехи современного естествознания. – 2007. – №10. – С.103-104.
18. Мельников Д.А. Применение агентных систем для оптимизации грузоперевозок // Наука и технологии железных дорог. 2022. Т. 6. №4 (24). – С.22-28
19. Цветков В.Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью // Мир транспорта. – 2013. – № 5 (49). – С.6-9.
20. Lyovin B.A. Earth Exploration from Space for Solving Transport Problems // Russian Journal of Astrophysical Research. Series A. 2017. – 3(1). С.13-28.
21. Розенберг И.Н. Пространственное управление в сфере транспорта // Славянский форум, 2015. – 2(8) – С.268-274.
22. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Информационные процессы в пространстве «больших данных» // Мир транспорта. 2017. – Т.15, №6(73). – С.20-30.
23. Reddy G.T. et al. Analysis of dimensionality reduction techniques on big data //Ieee Access. – 2020. – Т. 8. – С. 54776-54788.
24. Цветков В.Я., Титов Е.К. Интервальное решение ситуационной задачи // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 187-196.
25. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Среда поддержки интеллектуальных систем // Транспорт Российской Федерации. – 2011. -№ 6. – С.6-8.
26. Розенберг И.Н. Ситуационный центр как сложная организационно техническая система // Славянский форум. -2019. – 4(26). – С.129-138
27. Андреева О.А. Геоинформационное моделирование // Славянский форум. -2019. – 2(24). – С.7-12.
28. Цветков В.Я. Применение геоинформационных технологий для поддержки принятия решений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2001. – №4. – С.128-138.
29. Болбаков Р.Г. Философия информационных единиц // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014. – № 4(5). – С.76-88.
30. Бучкин В.А., Потапов А.С. Геоинформационное ситуационное моделирование // Славянский форум. -2020. – 2(28). – С.210-228.
31. Lin J., Cao L., Li N. How the completeness of spatial knowledge influences the evacuation behavior of passengers in metro stations: A VR-based experimental study //Automation in Construction. – 2020. – Т. 113. – С. 103136.
32. Щенников А.Н. Комплементарность при обработке информации // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2019. – № 1(11). – с. 24-30.
33. Козлов А.В. Анализ субсидиарных систем // Вестник МГТУ МИРЭА. 2019. № 69. – С.160-167.
34. He S., Fan B. Generalized wardrop principle and its application in regional transportation //Transportation research record. – 2008. – Т. 2085. – №. 1. – С. 49-56.