

Визуализация параметров и результатов моделирования задач оптимального планирования транспортировки грузов в беспилотных авиационных транспортных системах

А.Г. Подвесовский^{1,А}, А.А. Филонов^{2,А}, А.А. Захарова^{3,А}

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

¹ ORCID: 0000-0002-1118-3266, a.podvesovskiy@gmail.com

² ORCID: 0009-0002-4749-4290, afilonovcontact@gmail.com

³ ORCID: 0000-0003-4221-7710, zaa@ipu.ru

Аннотация

Особенности применения беспилотной техники в сфере грузоперевозок приводят к новым постановкам задач оптимизации плана транспортировки грузов, в которых необходимо учитывать одновременно несколько видов дополнительных условий и ограничений. Процесс моделирования таких задач требует учета и анализа множества разнородных параметров, которые целесообразно задавать в интерактивном режиме с использованием приемов и методов визуализации. Рассматривается один из типов задач формирования плана транспортировки разнородных грузов с применением беспилотных летательных аппаратов, и предлагается подход к построению визуальной модели с целью поддержки интерактивного задания параметров задачи и отображения результатов оптимизации с использованием визуального интерфейса. В основе предлагаемого подхода лежит понятие метафоры визуализации, включающей в себя пространственную метафору и метафору представления. Обсуждаются структура и особенности метафоры представления для различных вариантов постановки задачи и этапов ее моделирования.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, планирование транспортировки грузов, задача о максимальном потоке, визуальная модель, метафора визуализации.

1. Введение

Одним из направлений развития беспилотных авиационных систем в настоящее время является применение беспилотной авиации в сфере грузоперевозок [1, 2]. Специализированные транспортные беспилотные летательные аппараты (БЛА) могут эффективно применяться для доставки грузов первой необходимости в удаленные регионы, наземное сообщение с которыми затруднено или носит сезонный характер, в том числе в регионы, пострадавшие от стихийных бедствий. Как отмечается в [1], использование БЛА в этих случаях способствует снижению стоимости летного часа, а также уменьшению зависимости от погодных условий и отсутствию риска для жизни членов экипажа при возникновении чрезвычайных ситуаций в процессе выполнения полетных заданий. Другими актуальными и востребованными направлениями применения БЛА в сфере грузоперевозок являются перевозка опасных грузов и грузов, чувствительных к условиям транспортировки; транспортировка семян, удобрений, образцов почвы или растений между удаленными полевыми станциями и лабораториями; перемещение грузов между складами и распределительными центрами и др.

С учетом этого, актуальной задачей является создание роботизированных беспилотных авиатранспортных систем (БАТС) для применения в сфере грузоперевозок. Важная роль при ее решении принадлежит разработке математического, информационного и программного обеспечения систем управления БАТС [3], включая системы хранения, обработки и анализа данных, средства автоматического управления, системы связи, информационно-аналитические системы и системы поддержки принятия решений. Поддержка принятия решений требуется как при управлении исполнением полетных заданий, так и на этапе их планирования.

Планирование полетного задания для группы БЛА, осуществляющей транспортировку грузов, включает в себя ряд задач, среди которых можно выделить построение плана транспортировки, выбор БЛА с заданными характеристиками, формирование плана загрузки БЛА с учетом характеристик транспортируемых грузов и комплекса требований к условиям их транспортировки и др. [4]. Любая из этих задач требует учета и анализа множества данных, которые являются многомерными и могут различаться по формату, структуре и источникам получения. Так, при построении плана транспортировки грузов, оптимального по заданным целевым показателям, учитывается ряд параметров, описывающих состояние маршрутной сети, характеристики грузов, данные об их распределении в пунктах-источниках, а также текущем состоянии заказов на доставку с учетом их приоритетности. В свою очередь, информация о состоянии маршрутной сети должна включать данные о пропускной способности различных маршрутов и о затратах ресурсов при использовании на них определенных типов БЛА. К таким затратам могут относиться, например, время прохождения маршрута (включая время выполнения подготовительных и сопутствующих операций), стоимость транспортировки различных типов грузов и др.

Перечисленные особенности приводят к новым постановкам задач оптимизации плана транспортировки грузов, в которых необходимо учитывать одновременно несколько видов дополнительных условий и ограничений. В работах [5, 6] рассмотрены некоторые из этих задач, для них построены оптимизационные модели, и предложены алгоритмы нахождения оптимального плана. Вместе с тем, для обеспечения полноценной программной поддержки соответствующих моделей и алгоритмов важной задачей является создание визуальных интерфейсов, обеспечивающих интерактивную форму задания параметров оптимизационной модели и отображения результатов оптимизации, с использованием подходящих приемов и методов визуализации многомерных данных.

Вопросы построения визуальных моделей для задач оптимизации транспортировки грузов рассматривались, в частности, в работах [7, 8]. Вместе с тем, основное внимание в этих работах уделяется либо особенностям визуализации графовой структуры маршрутной сети (без учета многих перечисленных выше параметров, характеризующих оптимизационную модель в целом), либо имитационному моделированию уже построенных планов транспортировки. В данной статье предлагается подход к построению визуальных моделей, предназначенных для поддержки интерактивного задания параметров задачи построения оптимального плана транспортировки, а также для отображения результатов оптимизации с помощью визуального интерфейса, в том числе в среде геоинформационных систем. В основе предлагаемого подхода лежат понятия метафоры визуализации [9] и когнитивной ясности получаемого с ее помощью визуального образа [10]. Построение визуальной модели будем рассматривать на примере формирования плана транспортировки разнородных грузов с помощью БЛА в условиях ограниченной пропускной способности маршрутной сети с учетом приоритетности задач доставки [5].

2. Задача формирования плана транспортировки грузов: формализованное описание и общие принципы задания и визуализации параметров

Рассматривается задача поиска оптимального плана транспортировки грузов между источниками (хабами) и стоками (пунктами потребления), с учетом наличия в маршрутной сети промежуточных пунктов, где может выполняться как техническое обслуживание БЛА, так и перераспределение грузов. Задача состоит в том, чтобы определить, какие маршруты, из числа доступных на текущий момент с учетом состояния маршрутной сети, следует задействовать для транспортировки грузов, и какое количество единиц груза каждого типа подлежит транспортировке по выбранным маршрутам, так чтобы обеспечить выполнение текущих заявок на доставку. При этом учитывается не только возможный дефицит всех или некоторых видов груза, но также и ситуация, когда нельзя осуществить полную транспортировку всех грузов ввиду ограниченных пропускных способностей маршрутов.

Пусть $\Gamma = \langle A, W \rangle$ – ориентированный граф, задающий текущее состояние маршрутной сети, где A – множество вершин, соответствующих узлам сети, W – множество дуг, задающих коммуникации между узлами. Отсутствие дуги между парой узлов (i, j) , означает, что при текущем состоянии маршрутной сети прямой перелет БЛА из пункта i в пункт j невозможен.

Для каждого узла $i \in A$ можно выделить из множества A два ассоциированных с данным узлом подмножества:

$A_i^{IN} = \{j \in A \mid (j, i) \in W\}$, содержащее узлы, связанные дугой с узлом i ;

$A_i^{OUT} = \{j \in A \mid (i, j) \in W\}$, содержащее узлы, с которыми связан дугой узел i .

$G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ – множество грузов; $T = \{T_i^k \mid i \in A; k = 1, \dots, p\}$ – множество значений мощности узлов для каждого k -го типа груза, где мощность узла определяется следующим образом:

если $T_i^k > 0$, то величина T_i^k характеризует запас груза G_k в i -м узле (узел является источником k -го груза);

если $T_i^k < 0$, то величина $(-T_i^k)$ характеризует потребность груза G_k в i -м узле (узел является стоком k -го груза);

если $T_i^k = 0$, то i -й узел является транзитным для k -го груза.

$C = \{c_{ij}^k \mid (i, j) \in W; k = 1, \dots, p\}$ – затраты на транспортировку единицы груза G_k по маршруту (i, j) , при этом полагается $c_{ii}^k = 0, \forall i \in A$. Если по маршруту (i, j) транспортировка груза G_k (для некоторого k) не допускается, то полагают $c_{ij}^k = \infty$ (на практике можно использовать число, на 1-2 порядка превышающее максимальное значение c_{ij}^k из имеющихся во множестве C). Соответствующие маршруты называют *запрещенными для k -го вида груза*.

$X = \{x_{ij}^k \mid (i, j) \in W; k = 1, \dots, p\}$ – количество единиц груза G_k , транспортируемых по дуге (i, j) , т.е. набор X задает план транспортировки груза.

$U = \{u_{ij} \mid (i, j) \in W\}$ – пропускные способности маршрутов. При этом, если пропускная способность маршрута (i, j) не ограничивается, то полагаем (формально) $u_{ij} = \infty$. Можно рассмотреть подмножество $W' \subseteq W$, включающее в себя только те дуги, для которых имеется ограничение по пропускной способности: $W' = \{(i, j) \in W \mid u_{ij} < \infty\}$.

Невозможность осуществить транспортировку всего предназначенного к доставке груза вследствие имеющихся ограничений на пропускные способности маршрутов и возможного дефицита некоторых видов груза означает, что следует строить план транспортировки, ориентированный на первоочередное выполнение наиболее приоритетных заявок, с максимизацией суммарного потока груза, прошедшего по сети.

Будем называть *потоком груза* G_k суммарный объем (количество единиц) данного груза, доставленный в узлы, являющиеся его стоками ($T_i^k < 0$):

$$H^k = \sum_{i \in A, T_i^k < 0} \left(\sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k - \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k \right),$$

а *общим потоком* – суммарный объем доставки всех видов грузов во все стоки.

Таким образом, получаем задачу, которая представляет собой расширение известной задачи о максимальном потоке [11], учитывающее разнородность грузов и произвольную структуру маршрутной сети:

$$H = \sum_{k=1}^p \sum_{i \in A, T_i^k < 0} \left(\sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k - \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k \right) \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k - \sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k \leq T_i^k, i \in A, T_i^k > 0; \\ \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k - \sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k \geq T_i^k, i \in A, T_i^k < 0; \\ \sum_{j \in A_i^{OUT}} x_{ij}^k - \sum_{j \in A_i^{IN}} x_{ji}^k = 0, i \in A, T_i^k = 0; \\ \sum_{k=1}^p x_{ij}^k \leq u_{ij}, (i, j) \in W'; \\ x_{ij}^k \geq 0, (i, j) \in W; k = 1, \dots, p. \end{cases} \quad (2)$$

В рассматриваемых условиях невозможности построения полного плана транспортировки могут возникать следующие типы задач, связанные с заданием приоритетности доставки грузов [5].

1. В первую очередь необходимо организовать доставку каждого груза в наиболее приоритетные для него стоки. Будем говорить, что данная задача соответствует схеме «*приоритет стока для груза*».

2. В первую очередь необходимо обеспечить каждый сток наиболее приоритетными для него грузами. Данную задачу будем называть соответствующей схеме «*приоритет груза для стока*».

3. В первую очередь необходимо удовлетворить потребности наиболее приоритетных стоков. Иными словами, имеет место комплексное требование первоочередного обеспечения приоритетных стоков всеми необходимыми для них грузами. Будем говорить, что в данном случае используется схема «*безусловный приоритет стока*».

4. В первую очередь необходимо обеспечить стоки наиболее приоритетными грузами. Здесь первоочередной задачей является транспортировка наиболее приоритетных грузов. Для данной схемы используем название «*безусловный приоритет груза*».

Механизмы учета приоритетности для каждой из перечисленных задач зависят от вида предпочтений. Будем далее рассматривать лексикографические предпочтения [12], основанные на жестком приоритете более важных заявок над менее важными, когда невыполнение более важной заявки не может быть компенсировано выполнением заявки, имеющей меньшую важность.

Таким образом, в процессе моделирования рассматриваемой задачи будут иметь место ряд этапов, требующих интерактивного задания и/или визуализации данных.

На начальном этапе в интерактивном режиме и с использованием приемов визуализации могут задаваться общие параметры, характеризующие постановку задачи:

множество узлов A и дуг W маршрутной сети;

множество грузов G ;

наборы T значений мощности узлов для всех грузов, принадлежащих множеству G ;

величины затрат C на транспортировку грузов по имеющимся маршрутам;

значения U пропускных способности маршрутов.

Далее осуществляется выбор схемы приоритетности задач доставки и задание ее параметров, также с использованием различных приемов визуализации. Эти параметры дополняют или уточняют некоторые параметры, заданные на начальном этапе. Конкретный способ задания зависит от выбранной схемы:

при использовании схемы «*приоритет стока для груза*» для каждого груза G_k выделяется подмножество $D^k = \{d_1^k, d_2^k, \dots, d_{q_k}^k\}$ узлов, являющихся стоками данного груза, которое упорядочивается по убыванию приоритетов;

при использовании схемы «*приоритет груза для стока*» для каждого стока A_l выделяется подмножество $E^l = \{e_1^l, e_2^l, \dots, e_{m_l}^l\}$ грузов, в которых имеется потребность в стоке A_l , с упорядочением по убыванию их приоритетов для него;

при использовании схемы «*безусловный приоритет стока*» выделяется множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$ всех узлов, являющихся стоками хотя бы одного вида груза, которое упорядочивается по убыванию приоритета обеспечения грузами;

при использовании схемы «*безусловный приоритет груза*» выделяется множество грузов $G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ приоритета доставки.

Наконец, по результатам оптимизации необходимо выполнить визуализацию найденного оптимального плана транспортировки X .

На каждом из перечисленных этапов выполняется визуализация разного набора параметров, поэтому для каждого этапа требуется свой тип визуальной модели.

3. Общие принципы построения метафоры визуализации для задачи формирования плана транспортировки грузов

Подход к построению визуальной модели, основанный на понятии метафоры визуализации был предложен в [9] и получил развитие в ряде других работ, в том числе в [10] при решении задач визуализации графовых моделей.

Метафора визуализации представляет собой формализованное средство отображения характеристик данных исходной модели в пространство признаков визуальной модели. Она включает в себя совокупность принципов и правил, определяющих соответствие между элементами модели и визуальными образами, а также между их атрибутами и визуальными признаками. Метафора визуализации включает в себя две составляющие: пространственную метафору и метафору представления. Пространственная метафора определяет общие принципы переноса визуализируемого объекта в пространство визуальной модели. Метафора представления, применяемая в рамках выбранной пространственной метафоры, отвечает за доработку полученного визуального образа с целью выделения его составляющих, наиболее важных в контексте решаемой задачи. Ее целью является фокусирование внимания на содержательных аспектах визуального образа, требующих интерпретации.

Применительно к рассматриваемой задаче пространственная метафора задает расположение узлов графа маршрутной сети в пространстве карты территории. Для ее построения могут использоваться различные алгоритмы пространственного размещения графов [13]. Для полученного пространственного размещения далее строится метафора представления, формирующая визуальные образы узлов и дуг графа, соответствующих пунктам транспортной сети и маршрутам между ними. В рамках метафоры представления основная роль принадлежит сопоставлению атрибутов узлов и маршрутов и приемов визуализации.

В соответствии с метафорой представления, визуальный образ рассматриваемой задачи будет содержать ряд визуальных признаков, среди которых:

- для узла (помимо пространственного расположения, задаваемого пространственной метафорой) – форма, цвет, размер объекта, представляющего узел, а также дополнительные графические элементы, например, надписи, элементы инфографики;
- для маршрута между узлами – прежде всего цвет и толщина дуги, а также надписи.

Для построения метафоры представления необходимо обеспечить сопоставление между визуализируемыми параметрами (атрибутами модели) и перечисленными визу-

альными признаками. При этом, поскольку число визуализируемых параметров превышает допустимое число визуальных признаков, не приводящих к перегрузке визуального образа, то целесообразно говорить о выделении нескольких метафор представления, визуализирующих отдельные свойства задачи или этапы ее моделирования. При этом от выбора метафоры представления зависит степень когнитивной ясности визуального образа и удобство интерактивного задания параметров задачи формирования плана транспортировки.

4. Метафора представления задачи формирования плана транспортировки грузов

Как было отмечено ранее, визуализация задачи формирования плана транспортировки грузов основана на представлении маршрутной сети в виде графа, состоящего из узлов и дуг, дополненных атрибутивной информацией. При этом узлы имеют географическую привязку и соответствуют точкам на карте.

Для визуализации узлов используется представление в виде пиктограмм или геометрических примитивов, соединенных прямыми линиями. Цвет и толщина линий характеризуют свойства маршрутов. Рядом с узлами отображаются элементы инфографики, иллюстрирующие значения их мощности по разным видам груза.

Общая структура метафоры представления для этапа постановки задачи представлена в табл. 1. Данные параметры являются общими для любой схемы приоритетности и призваны максимально наглядно показать основные свойства конкретной постановки задачи.

Таблица 1 – Общая структура метафоры представления для этапа постановки задачи

Атрибут	Область значений	Представление
Идентификатор узла	Строка	Круг с названием в виде буквы с цифрой на координатах узла
Мощность по типам грузов	Вектор целых чисел	Набор элементов инфографики, характеризующих запасы груза (зеленый цвет, положительное число) или потребность в нем (красный цвет, отрицательное число)
Затраты на транспортировку грузов для маршрута	Вектор целых чисел	Цвет дуги – зеленый оттенок соответствует низким затратам на транспортировку, красный соответствует высоким
Пропускная способность маршрута для грузов	Вектор целых чисел	Толщина дуги – чем выше, тем выше пропускная способность

На рисунке 1 показан пример визуализации начальных параметров в соответствии с приведенной выше метафорой представления.

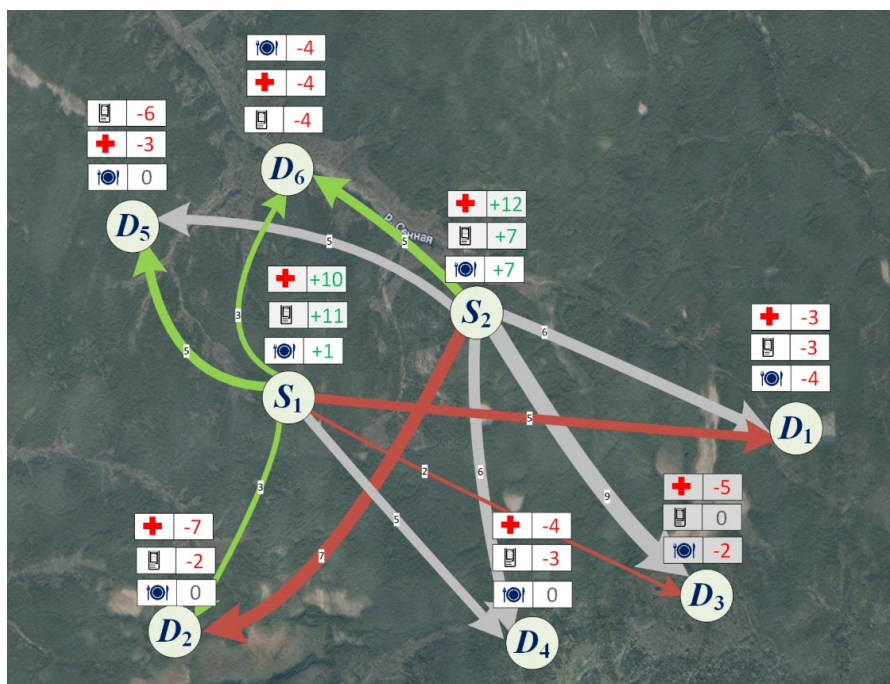


Рисунок 1 – Визуализация начальных параметров задачи формирования плана транспортировки грузов

Атрибуты, зависящие от выбранной схемы приоритетности, представлены отдельно в табл. 2.

Таблица 2 – Дополнительные атрибуты метафоры представления, зависящие от схемы приоритетности

Атрибут	Область значений	Представление
Приоритеты стоков для груза	Упорядоченное множество	Инфографика разных типов грузов упорядочивается сверху вниз по убыванию приоритета доставки в стоки
Приоритет грузов для стока	Упорядоченное множество	Инфографика разных типов грузов упорядочивается сверху вниз по убыванию приоритета заявок на доставку отдельно для каждого узла
Безусловные приоритеты грузов	Упорядоченное множество	Инфографика разных типов грузов упорядочивается сверху вниз по убыванию приоритета обеспечения им стоков
Безусловные приоритеты стоков	Упорядоченное множество	Цвет заливки узла

Рассмотрим визуализацию параметров каждой из схем приоритетности более подробно.

Схема «Приоритет стока для груза». Пример визуализации данной схемы представлен на рисунке 2. Рассматриваются приоритеты заявок на доставку грузов между всеми стоками. Как указывалось ранее, для каждого груза G_k задается подмножество $D^k = \{d_1^k, d_2^k, \dots, d_{q_k}^k\}$ узлов, являющихся стоками данного груза, которое упорядочивается по убыванию приоритетов. Инфографика в данной схеме отражает заявку на доставку груза заданного типа. Цвет заливки показывает относительный приоритет доставки груза данного типа в данный сток.

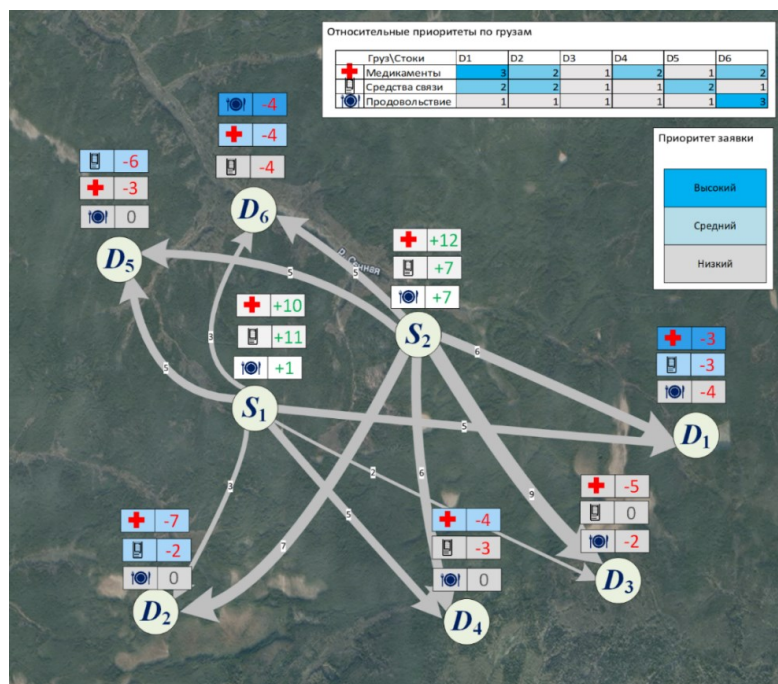


Рисунок 2 – Визуализация параметров схемы «Приоритет стока для груза»

Схема «Приоритет груза для стока». Пример визуализации данной схемы представлен на рисунке 3. Рассматриваются приоритеты грузов каждого типа внутри каждого стока. Соответственно, визуализации подлежит $E^l = \{e_1^l, e_2^l, \dots, e_{m_l}^l\}$ – подмножество грузов, в которых имеется потребность в стоке A_l , упорядоченное по убыванию их приоритетности для данного стока. Представлением множества E^l для стока A_l является набор элементов инфографики отражающих потребность в грузе данного типа. Порядок следования элементов отражает порядок убывания приоритетов грузов. С целью улучшения восприятия, элементы инфографики для грузов одинакового типа выделены одинаковым цветом – так различия в порядке следования грузов становятся более заметными.

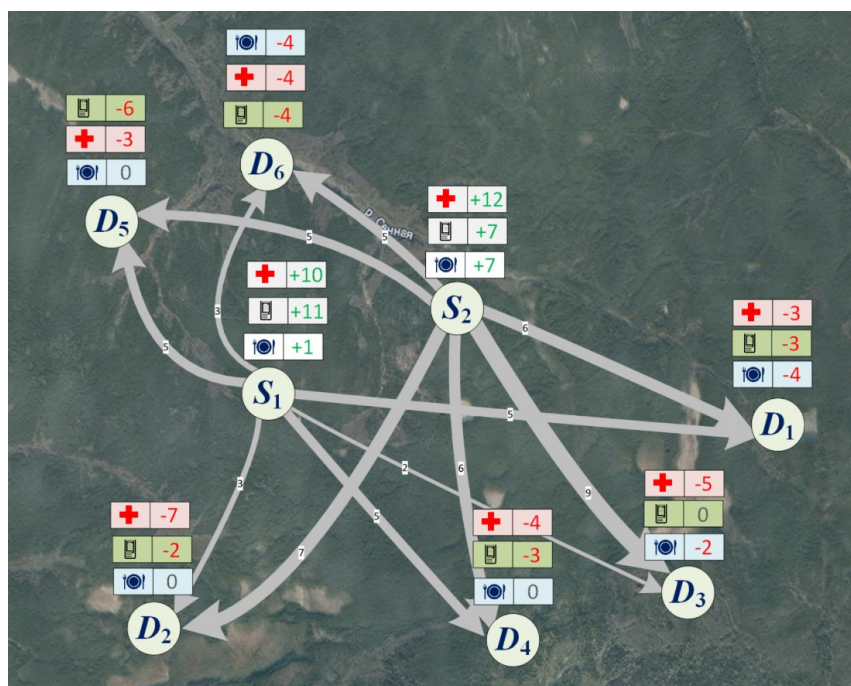


Рисунок 3 – Визуализация параметров схемы «Приоритет груза для стока»

Схема «Безусловный приоритет стока». Пример визуализации данной схемы представлен на рисунке 4. Рассматриваются приоритеты стоков относительно всех типов груза одновременно. Визуализации подлежит множество $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$ всех узлов, являющихся стоками хотя бы одного вида груза, которое упорядочивается по убыванию приоритета обеспечения грузами. Для его визуализации используется цвет заливки стоков: высоким значениям приоритета соответствует теплый цвет, низким значениям – холодный. Элементы инфографики отражают только заявки на доставку грузов и не несут информации о приоритете.

Схема «Безусловный приоритет груза». Пример визуализации данной схемы представлен на рисунке 5. Рассматриваются приоритеты грузов относительно всех стоков одновременно. Визуализации подлежит множество грузов $G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$, упорядоченное по убыванию приоритета доставки. Для визуализации применяется цветовая заливка элементов инфографики: грузам с более высоким приоритетом соответствуют более насыщенные оттенки в пределах градиентной шкалы. Элементы инфографики размещаются в порядке убывания приоритета грузов.

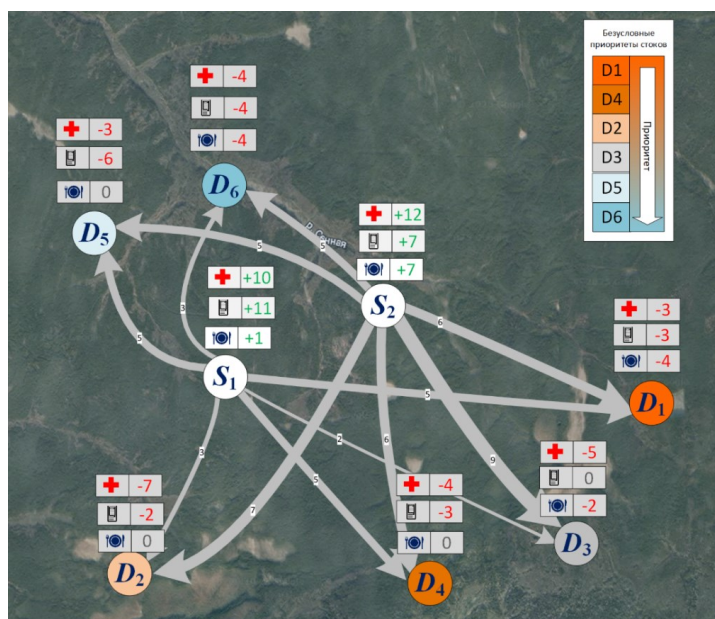


Рисунок 4 – Визуализация параметров схемы «Безусловный приоритет стока»

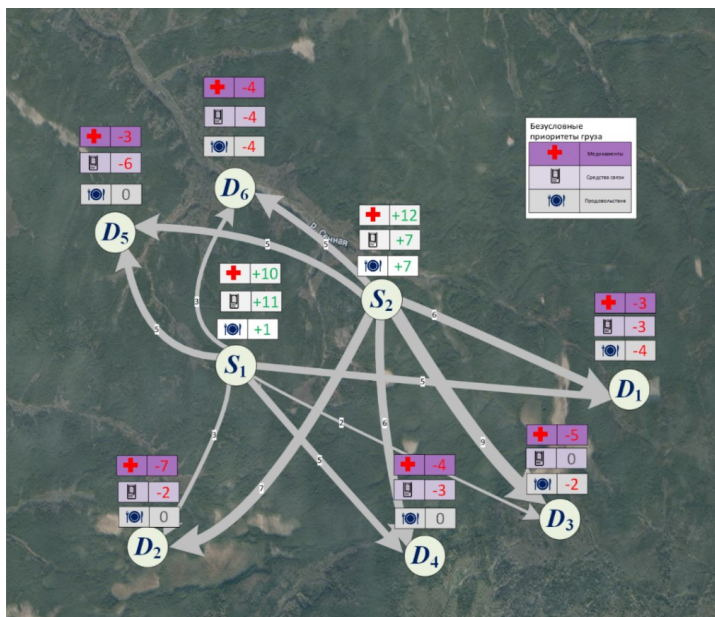


Рисунок 5 – Визуализация параметров схемы «Безусловный приоритет груза»

Таблица 3 – Структура метафоры представления для отображения плана транспортировки

Атрибут	Область значений	Представление
План транспортировки для маршрута	Вектор целых чисел	Набор чисел рядом с дугой – отображает объем каждого типа груза, перемещаемого по данному маршруту
Поток груза	Целое число	Толщина дуги – соответствует суммарному потоку груза, проходящему по маршруту
Степень неполноты выполнения заявок	Вектор целых чисел	Инфографика разных типов грузов – отображает объем заявок, оставшихся неудовлетворенными (отрицательное число) или избыток груза, оставшийся в источнике (положительное число)
Остаточные пропускные способности	Целое число	Цвет дуги – отображает разницу между суммарным потоком груза, прошедшим по маршруту, и пропускной способностью данного маршрута

Пример визуализации плана транспортировки, полученного в результате решения соответствующей оптимизационной задачи, показан на рисунке 6.

В соответствии со структурой метафоры представления, описанной в табл. 3, элементы инфографики возле узлов отражают состояние маршрутной сети после реализации плана транспортировки, т.е. объемы невыполненных заявок, а также грузов, оставшихся в источниках. Толщина стрелок показывает суммарный поток грузов, прошедших по соответствующим маршрутам, а числовые значения потока каждого груза отражены в виде надписей на стрелках.

Толщина дуг задает пропускную способность соответствующих маршрутов, которая дополнительно отображается в виде числового значения. Цвет дуги отражает остаточную (т.е. не использованную) пропускную способность соответствующего маршрута.

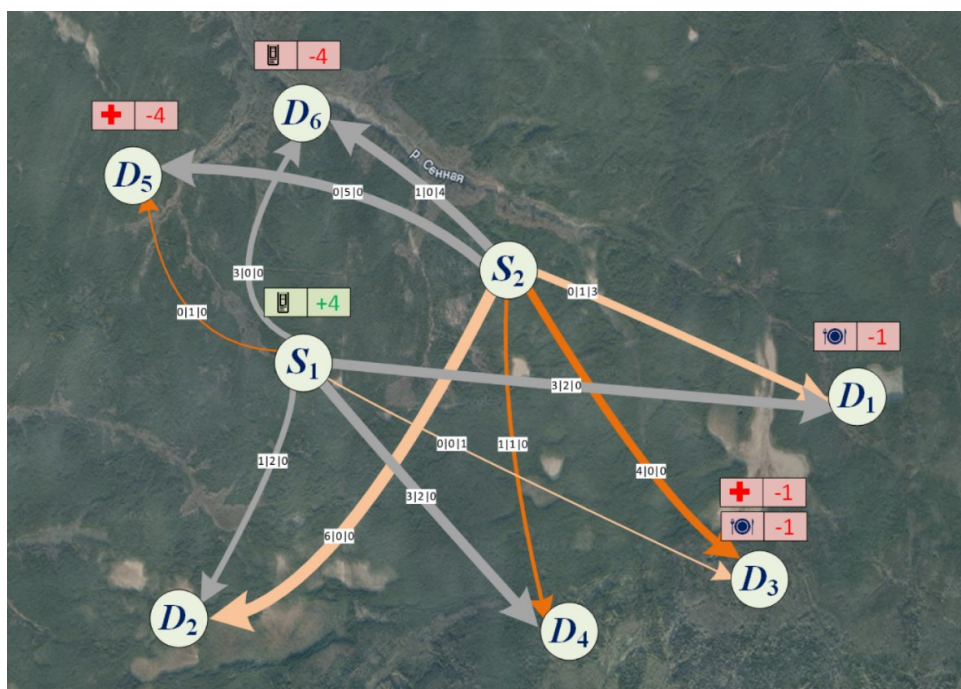


Рисунок 6 – Визуализация результирующего плана транспортировки

5. Программная поддержка визуальных моделей

Для программной поддержки предложенного подхода к построению визуальных моделей был создан модуль, которая является частью программного комплекса моделирования задач планирования и оптимизации транспортировки грузов в беспилотных транспортных системах, выполняя роль подсистемы визуализации и интерактивного задания параметров оптимизационной модели. Непосредственно решение задачи оптимизации (1)-(2) выполняется посредством отдельного подключаемого модуля, в котором реализованы алгоритмы, описанные в [5].

Интерфейс модуля (на примере визуализации параметров оптимизационной задачи с использованием схемы «Приоритет груза для стока») представлен на рисунке 7.

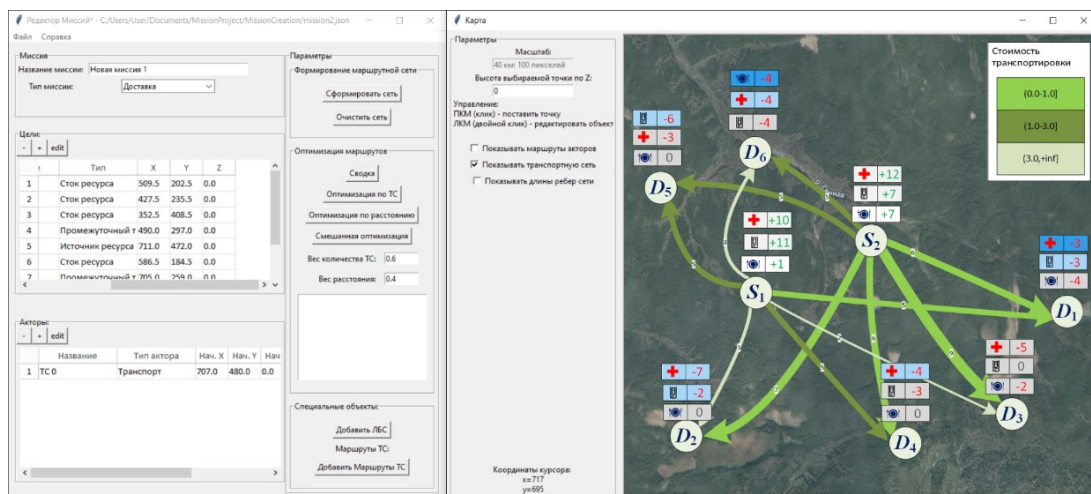


Рисунок 7 – Интерфейс программного модуля

Для разработки программного модуля использовались платформа PyQt5, язык программирования Python и набор библиотек геоинформационной системы QGIS [14]. Модуль позволяет загружать заранее подготовленные данные, задающие информацию о состоянии маршрутной сети, задавать и редактировать в интерактивном режиме параметры, определяющие постановку задачи, и визуализировать его с применением рассмотренной метафоры. Кроме того, имеется возможность сохранения построенной модели, с целью обеспечения возможности повторного использования.

6. Экспериментальное исследование

Чтобы оценить наглядность и информативность разработанных визуальных моделей, рассмотрим следующий пример. Обратимся к рисунку 1, на котором представлена визуальная модель постановки оптимизационной задачи. В таблице 4 представлены использованные при ее построении значения мощности узлов по каждому типу груза (для узлов-источников S_1 , S_2 значения мощности соответствуют величинам запасов, а для узлов-стоков D_1 , D_2 , ..., D_6 – объемам потребностей). В таблице 5 представлены значения пропускной способности маршрутов, также использованные при построении рассматриваемой визуальной модели.

Таблица 4 – Мощности узлов по типам груза

Узел Тип груза	S_1	S_2	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
Медикаменты	10	12	-3	-7	-5	-4	-3	-4
Средства связи	11	7	-3	-2	0	-3	-6	-4
Продовольствие	1	7	-4	0	-2	0	0	-4

Таблица 5 – Пропускные способности маршрутов

Источник \ Сток	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
S_1	5	3	2	5	5	3
S_2	6	7	9	6	5	3

В соответствии с метафорой представления, толщина стрелок на рисунке 1 отражает пропускную способность маршрутов. Так, наименьшую толщину имеет дуга из S_1 в D_3 , а наибольшую – дуга из S_2 в D_3 . Это согласуется с данными таблицы 5 – пропускные способности указанных маршрутов действительно равны 2 и 9 соответственно, в то время как для остальных маршрутов их значения лежат в диапазоне от 3 до 7.

Пусть для рассматриваемой задачи информация о приоритетности задач доставки задается с использованием схемы «приоритет стока для груза» и имеет вид, представленный в таблице 6.

Таблица 6 – Приоритеты стоков для грузов

Тип груза \ Сток	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
Медикаменты	3	2	1	2	1	2
Средства связи	2	2	1	1	2	1
Продовольствие	1	1	1	1	1	3

Значения приоритетов из таблицы 6 были использованы для построения визуальной модели, представленной на рисунке 2. Можно заметить, что на рисунке 2 наиболее яркий цвет заливки имеют заявки на доставку медикаментов в сток D_1 и продовольствия в сток D_6 . Это согласуется с данными таблицы 6 – именно эти заявки имеют наивысший приоритет.

В результате решения задачи оптимизации был получен план транспортировки, представленный в таблице 7.

Таблица 7 – План транспортировки грузов

Сток		D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
Источник	Тип груза	Количество транспортируемых единиц груза					
S_1	Медикаменты	3	1	0	1	0	3
	Средства связи	2	2	0	1	1	0
	Продовольствие	0	0	1	0	0	0
S_2	Медикаменты	0	6	4	3	0	1
	Средства связи	1	0	0	2	5	0
	Продовольствие	3	0	0	0	0	4

Вследствие дефицита грузов и ограниченной пропускной способности маршрутной сети некоторые заявки на доставку грузов не выполнены в полном объеме. Информация об остатках грузов в источниках и недополучении грузов стоками, т.е. величинах так называемых остаточных мощностей источников и стоков, представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Величины остаточных мощностей узлов по типам грузов

Тип груза \ Узел	S_1	S_2	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
Медикаменты	0	0	0	0	-1	0	-4	0
Средства связи	4	0	0	0	0	0	0	-4
Продовольствие	0	0	-1	0	-1	0	0	0

Наденный план транспортировки соответствует плану, представленному ранее на рисунке 7. Визуальный анализ рисунка 7 позволяет сделать ряд выводов. Например, заявка на доставку средств связи в сток D_6 не была исполнена, несмотря на наличие достаточного количества единиц этого груза в S_2 . Можно заметить, что дуги ведущие в сток D_6 , имеют серый цвет, что говорит о полном использовании пропускной способно-

сти этих маршрутов. Этот вывод подтверждается сопоставлением данных таблиц 5 и 7. При этом из таблицы 6 следует, что заявки на доставку средств связи имели наименьший приоритет из всех заявок на доставку грузов в сток D_6 .

Таким образом, предложенная метафора представления для визуальной модели плана транспортировки позволяет наглядно отобразить причины неисполнения заявки – низкий приоритет доставки средств связи в сток D_6 одновременно с недостаточной пропускной способностью ведущих в него маршрутов. Решением проблемы могло бы стать повышение приоритета заявки данного стока на обеспечение средствами связи, что могло бы привести к более полному ее удовлетворению, при этом, возможно, ценой частичного неисполнения заявок по другим грузам. В качестве альтернативного решения можно было бы попытаться повысить пропускную способность маршрута из S_2 в D_6 , если это является возможным.

Иную ситуацию можно наблюдать в отношении заявок на доставку медикаментов и продовольствия в стоки D_1 , D_3 и D_4 . В каждый из этих узлов направлено хотя бы по одной ярко окрашенной дуге, что говорит о наличии неиспользованной пропускной способности маршрутов, ведущих из источников в указанные стоки. Сопоставление данных таблиц 5 и 7 это подтверждает. Однако, элементы инфографики, связанные с перечисленными стоками, позволяют сделать вывод об отсутствии остаточного запаса медикаментов и продовольствия во всех источниках, что также подтверждается таблицей 8. Таким образом, визуальная модель позволяет сделать вывод, что заявки на транспортировку некоторых грузов в узлы D_1 , D_3 и D_4 не были полностью удовлетворены по причине дефицита этих грузов в источниках, и решить эту проблему можно только за счет увеличения их запаса в системе в целом.

7. О когнитивной ясности предложенных визуальных моделей

Покажем, что предложенный способ построения метафор представления отвечает принципам их построения, описанным в [10] и способствующим повышению когнитивной ясности соответствующих визуальных моделей.

1. *Принцип частичной визуализации.* В соответствии с данным принципом, в каждый момент времени визуализируется лишь подмножество элементов модели и их атрибутов (или, в терминах, введенных ранее, одно представление). Это обусловлено как высокой структурной и параметрической сложностью моделей, зачастую превышающей когнитивные возможности аналитика, так и этапностью процесса анализа, в рамках которого на определенной стадии возникает необходимость в отображении только части информации, связанной с моделью. Соответствие *принципу частичной визуализации* проявляется в выборе различных метафор представления для данных, соответствующих различным этапам решения задачи формирования плана транспортировки. Благодаря этому визуализируются только те свойства модели, которые требуются для анализа на каждом конкретном этапе.

2. *Принцип инъективной визуализации.* Согласно данному принципу, каждому атрибуту модели в рамках одной метафоры визуализации должен соответствовать уникальный визуальный признак. Иными словами, один и тот же визуальный элемент не должен одновременно представлять два или более различных атрибута, поскольку это приводит к смешению свойств модели и затрудняет их корректную интерпретацию аналитиком. Соответствие *принципу инъективной визуализации* обусловлено тем, что различные атрибуты модели визуализируются по-разному. Так, в метафорах представления постановки и решения задачи используется тематически окрашенные стрелки, но поскольку этот прием используется для отображения разных свойств, цвет стрелок выбирается различным. При этом можно отметить сходство приемов визуализации близких понятий, например толщина стрелок для отображения пропускной

способности маршрутов для постановки задачи и для отображения фактического использования пропускной способности для ее решения.

3. *Принцип сюръективной визуализации.* Данный принцип означает, что каждый визуальный признак должен отображать атрибут, значимый в контексте решаемой задачи. Представление не должно включать визуальные признаки, не несущие содержательной нагрузки в рамках текущего анализа, поскольку это приводит к перегрузке восприятия и снижает эффективность визуального анализа. Соответствие данному принципу обусловлено отсутствием в визуальных моделях лишних, не значимых атрибутов.

4. *Принцип подчинения.* Согласно этому принципу, визуальное представление подчиненных элементов должно обеспечивать возможность однозначной идентификации их принадлежности к конкретным вышестоящим элементам модели. Частным случаем реализации принципа подчинения является отображение логической вложенности элементов в виде соответствующей визуальной иерархии. Примером, подтверждающим соответствие *принципу подчинения*, может служить соответствие элементов инфографики, отражающих мощность по видам грузов, тем узлам, к которым они визуально относятся.

5. *Принцип переструктурирования.* В ряде случаев возможно объединение двух дискретных атрибутов в один посредством декартова произведения их областей значений. Применение данного принципа способствует оптимизации визуального представления за счет более эффективного использования доступных визуальных параметров. Примером соответствия *принципу переструктурирования* может служить выделение остаточной пропускной способности маршрута как отдельного визуализируемого свойства, имеющего составную природу – она является разностью исходной пропускной способности маршрута и объемом фактически прошедшего по нему потока грузов.

8. Заключение

Использование визуальных моделей для наглядного отображения множества разнородных параметров, характеризующих задачу формирования оптимального плана транспортировки разнородных грузов с помощью БЛА, обеспечивает интерактивность взаимодействия ЛПР с оптимизационной моделью и в целом способствует повышению его ситуационной осведомленности при решении задач планирования полетных заданий. В статье предложен подход к построению визуальной модели для одного из типов задачи формирования плана транспортировки – максимизации потока грузов в условиях ограниченной пропускной способности маршрутной сети, где в качестве дополнительных условий выступали различные схемы приоритетности задач доставки грузов в стоки. В дальнейшем предполагается рассмотреть визуальные модели для других типов задач, например, задачи формирования плана транспортировки, оптимального по критерию минимума времени [6], или задачи максимизации потока груза в условиях ограничения времени транспортировки. Еще одним направлением дальнейших исследований является разработка визуальных моделей для задач оперативного мониторинга и управления исполнением полетных заданий.

Список источников

1. Матюха С.В. Беспилотные авиационные системы в грузоперевозках // Транспортное дело России. 2022. № 1. С. 141-143. https://doi.org/10.52375/20728689_2022_1_141
2. Воронов В.В. Беспилотные авиасистемы для грузоперевозок: возможности и перспективы [Электронный ресурс] // Авиатранспортное обозрение. Деловой авиационный портал. Режим доступа: <http://www.ato.ru/content/bespilotnye-aviasistemy-dlya-gruzoperevozok-vozmozhnosti-i-perspektivy-1-ya-chast> (часть 1),

<http://www.ato.ru/content/bespilotnye-aviasistemy-dlya-gruzoperevozok-ocenka-razrabotok-chast-2> (часть 2) (дата обращения 10.07.2025).

3. Кутахов В.П., Смолин А.Л., Настас Г.Н. К вопросу о создании беспилотной авиационной транспортной системы // Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения: Сб. докл. 1-й Междунар. науч.-техн. конф. М.: Изд-во «Перо», 2022. С. 177-180.

4. Захарова А.А., Кутахов В.П., Мещеряков Р.В., Подвесовский А.Г., Смолин А.Л. Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной транспортной системе // Авиакосмическое приборостроение, 2023, № 3. С. 3-15. <https://doi.org/10.25791/aviakosmos.3.2023.1326>

5. Podvesovskii A., Zakharova A. Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Using UAVs with Different Priority Schemes for Delivery Tasks // Bolshakov, A.A. (eds) Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control. Vol 554. Springer, Cham. 2024, Pp. 165-177. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67685-7_12

6. Podvesovskii A., Meshcheryakov R., Zakharova A. Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Plan in Unmanned Air Transportation System by the Criterion of Minimum Time // 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2024. IEEE Catalog Number CFP24GAE-ART. Pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/MLSD61779.2024.10739506>

7. Абдаев Р.Б., Ветрова О.А. Применение средств визуализации для задач оптимизации транспортной модели // Научная визуализация. 2023. Т. 15(2). С. 22-37. <https://doi.org/10.26583/sv.15.2.03>

8. Deng Z., Chen H., Lu Q.-L. et.al. Visual comparative analytics of multimodal transportation // Visual Informatics. 2025. Vol. 9 (1). Pp. 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2025.01.001>

9. Захарова А.А., Шкляр А.В. Метафоры визуализации // Научная визуализация. 2013. Т. 5(2). С. 16-24.

10. Исаев Р.А., Подвесовский А.Г. Визуализация графовых моделей: подход к построению метафор представления. Научная визуализация. 2021. Т. 13(4). С. 9-24. <https://doi.org/10.26583/sv.13.4.02>

11. Корте Б., Фиген Й. Комбинаторная оптимизация. Теория и алгоритмы / Пер. с англ. М.А. Бабенко. М.: МЦНМО, 2015. 720 с.

12. Подиновский В.В. Многокритериальные задачи принятия решений: теория и методы анализа. М.: Изд-во Юрайт, 2022. 486 с.

13. Касьянов В., Касьянова Е. Визуализация информации на основе графовых моделей // Научная визуализация. 2014. Т. 6 (1). С. 31-50.

14. QGIS Documentation. QGIS User Guide [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.qgis.org/ru/latest/> (дата обращения: 10.07.2025).

Visualization of Parameters and Results of Modeling Optimal Cargo Transportation Planning Tasks in Unmanned Aircraft Transport Systems

A.G. Podvesovskii^{1,A}, A.A. Filonov^{2,A}, A.A. Zakharova^{3,A}

Institute of Control Sciences RAS

¹ ORCID: 0000-0002-1118-3266, a.podvesovskiy@gmail.com

² ORCID: 0009-0002-4749-4290, afilonovcontact@gmail.com

³ ORCID: 0000-0003-4221-7710, zaa@ipu.ru

Abstract

The peculiarities of unmanned vehicle application in the field of cargo transportation lead to the formulation of new problems for optimising cargo transportation plans, where several types of additional constraints and conditions must be taken into consideration simultaneously. The process of solving such problems requires considering and analysing numerous heterogeneous parameters, which is most effective when done interactively using visualisation techniques. We consider a problem involving the formation of heterogeneous cargo transportation plans using unmanned aerial vehicles, and propose an approach for constructing a visual model to support the interactive setting of problem parameters and to display optimisation results via a visual interface. This approach is based on the concept of visualisation metaphors, including spatial and representational metaphors. The structure and features of the metaphorical representation for different problem formulations and modelling stages are discussed.

Keywords: unmanned aerial vehicle, cargo transportation planning, maximum flow problem, visual model, visualization metaphor.

References

1. Matyukha, S.: Unmanned aerial systems in cargo transportation. *Transport Business in Russia* 1, 141-143 (2022). [in Russian]. https://doi.org/10.52375/20728689_2022_1_141
2. Voronov, V.V.: Unmanned aerial systems for cargo transportation: opportunities and prospects. *Air Transport Review. Business Aviation Portal*. URL: <http://www.ato.ru/content/bespilotnye-aviasistemy-dlya-gruzoperevozok-vozmozhnosti-i-perspektivy-1-ya-chast> (part 1), <http://www.ato.ru/content/bespilotnye-aviasistemy-dlya-gruzoperevozok-ocenka-razrabotok-chast-2> (part 2). [in Russian].
3. Kutakhov, V.P., Smolin, A.L., Nastas, G.N.: On the issue of creating an unmanned aircraft transport system. In: *Proceedings of the 1st International Conference on High-Speed Transport Development*, pp. 177-180 (2022). [in Russian].
4. Zakharova, A.A., Kutakhov, V.P., Meshcheryakov, R.V., Podvesovskii, A.G., Smolin, A.L.: Modeling of cargo transportation tasks in an unmanned aerial transportation system. *Aerospace Instrument-Making* 3, 3-15 (2023). [in Russian]. <https://doi.org/10.25791/aviakosmos.3.2023.1326>
5. Podvesovskii, A., Zakharova, A.: Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Using UAVs with Different Priority Schemes for Delivery Tasks. In: Bolshakov, A.A. (eds) *Cyber-Physical Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 554, pp. 165-177 (2024). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67685-7_12
6. Podvesovskii, A., Meshcheryakov, R., Zakharova, A.: Optimization of Heterogeneous Cargo Transportation Plan in Unmanned Air Transportation System by the Criterion of Min-

- imum Time. In: 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russian Federation, IEEE Catalog Number CFP24GAE-ART, pp. 1-5 (2024). <https://doi.org/10.1109/MLSD61779.2024.10739506>
7. Abdaev, R.B., Vetrova, O.A.: Application of Visualization Tools for Optimization Problems of the Transport Model. *Scientific Visualization*, 15(2). 22-37 (2023). <https://doi.org/10.26583/sv.15.2.03>
 8. Deng, Z., Chen, H., Lu, Q.-L. et.al.: Visual comparative analytics of multimodal transportation. *Visual Informatics*, 9(1). 18-30 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2025.01.001>
 9. Zakharova, A.A., Shklyar, A.V.: Visualization Metaphors. *Scientific Visualization*, 5(2), 16-24 (2013).
 10. Isaev, R.A., Podvesovskii, A.G.: Visualization of Graph Models: An Approach to Construction of Representation Metaphors. *Scientific Visualization*, 13(4). 9-24 (2021). <https://doi.org/10.26583/sv.13.4.02>
 11. Korte, B., Vygen J.: *Combinatorial Optimization. Theory and Algorithms*, Fifth Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2012).
 12. Podinovskii, V.V.: *Multicriteria decision-making problems: theory and methods of analysis*, Urait, Moscow, Russia (2022). [in Russian].
 13. Kasyanov, V., Kasyanova, E.: Information Visualization on the Base of Graph Models. *Scientific Visualization* 6 (1), 31–50 (2014).
 14. QGIS Documentation. QGIS User Guide. URL: <https://docs.qgis.org/ru/latest/>