

ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ

Научная статья

УДК 658.78 : 658.56

DOI: 10.36535/0236-1914-2022-08-4

ПЛАНИРОВАНИЕ МАРШРУТОВ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Палагин Юрий Иванович,

profypal@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3577-516X>,

Зверева Анастасия Сергеевна,

zverevvva@yandex.ru

(Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации. Санкт-Петербург, Россия)

Аннотация. Рассматриваются задачи планирования логистическим провайдером доставки малогабаритных грузов с помощью беспилотных летательных аппаратов. Анализируются типы клиентских заказов, возникающие в различных по характеру задачах транспортного обслуживания. Существенным является комбинированные заказы, сочетающие доставку грузов в адрес одного получателя с забором грузов и последующей их развозкой получателем. Приводится описание математической модели сформулированной задачи, а также базовые уравнения оптимизационных моделей. Описывается программный комплекс SupKIRoutMaster оптимального планирования маршрутов, реализующий разработанные алгоритмы. Приводятся примеры.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, логистические провайдеры, мелкие отправления, заказы сложной структуры, оптимальные маршруты, модели и алгоритмы оптимизации, программное обеспечение

Для цитирования: Палагин Ю.И., Зверева А.С. Планирование маршрутов доставки грузов беспилотными летательными аппаратами // Транспорт: наука, техника, управление. 2022. № 8. С. 26-31. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-08-4.

AIR TRANSPORT

Scientific article

ROUTE PLANNING OF CARGO DELIVERY BY UNMANNED AERIAL VEHICLES

Palagin Yuri I.,

profypal@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3577-516X>,

Zvereva Anastasia. S.,

zverevvva@yandex.ru

(State University of Civil Aviation. Saint Petersburg)

Abstract. The tasks of planning by a logistics provider for the delivery of small-sized cargo using unmanned aerial vehicles are considered. The types of customer orders arising in transport service tasks of different nature are analyzed. It is essential to combine orders combining the delivery of goods to the address of one recipient with the collection of goods and their subsequent delivery to recipients. The description of the mathematical model of the formulated problem is given. The basic equations of optimization models are given. The software package SupKIRoutMaster for optimal route planning, which implements the developed algorithms, is described. Examples are given.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, logistical provider, delivery orders, optimal delivery routing, optimization models and algorithms, software

For Citation: Palagin Yu.I., Zvereva A.S. Route Planning of Cargo Delivery by Unmanned Aerial Vehicles // Transport: science, equipment, management 2022. (8): P. 26-31. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-08-4.

Введение

Конкурентоспособность отечественных грузовых транспортно-логистических компаний определяется их технологическими возможностями в реализации современных систем транспортировки. Традиционное использование автомобильного транспорта или обычных схем мультимодальных перевозок [1-5] в ряде случаев

ограничивается особенностями транспортной сети региона обслуживания. В крупных городах доставка может быть затруднительной из-за перегруженности дорог, заторов на магистралях, особенно в выходные и предпраздничные дни. Это фактор становится критическим для перевозок экспресс-грузов, которые должны быть доставлены к определенному времени.

В регионах существует ряд причин, по которым невозможно использовать автомобильный транспорт. Таковыми причинами, например, являются:

- горная местность (Кавказ), в которой расположены небольшие поселки (аулы) и транспортная доступность в которые ограничена даже в благоприятные сезоны. В весенние, зимние и осенние сезоны дороги блокируются снежными завалами, рисками обвалов, оползнями;
- тундра, заболоченная труднопроходимая местность (Якутия), разливы рек;
- регионы, разделенные крупными и мелкими реками, разрезающими его на отдельные острова-анклавы и др.

В таких случаях для доставки начинают все в большей степени использоваться беспилотные летательные аппараты (БЛА). Сфера их использования для перевозок пока очень ограниченная. Однако транспортно-логистические компании как за рубежом, так и в РФ начинают их постепенное применение для выполнения коммерческих перевозок [6,7].

В настоящей работе рассматриваются задачи использования БЛА для транспортно-логистического обслуживания, предлагаются математические модели и применение компьютерных программ для планирования маршрутов доставки.

1. Описание транспортно-логистического процесса

Примем, что данные о заказах для планирования перевозок представлены в виде матрицы

$$W = (W_{ij}), \quad (1)$$

элементы W_{ij} , которой представляют количество груза («тоннаж»), отгружаемого i -ым грузоотправителем (ГО) для j -ого клиента грузополучателя (ГП). Матрица содержит $N_{ГО}$ строк и $N_{КЛ}$ столбцов, $N_{ГО}$ – количество ГО, $N_{КЛ}$ – количество ГП. Мы сохраним здесь общее название матрицы тоннажа, хотя ее элемент обозначает количество ячеек грузового отсека (или единиц груза), которое необходимо доставить.

Заданы также матрица расстояний $R = (r_{ij})$ между всеми пунктами объезда и матрица затрачиваемых на перевозку временных ресурсов с элементами T_{ij} , означающими время, необходимое для перевозки между i -ым и j -ым пунктами посещения. Планирующий менеджер располагает парком из m типов транспортных средств (ТС). Каждый тип ТС характеризуется параметрами: G_l – грузоподъемностью (или грузоподъемностью), измеряемой в тех же единицах, что и грузы, стоимостью подачи C_{0l} [руб], стоимостью C_l [руб/км] пробега на 1 км пути и стоимостью простоя под погрузочно-разгрузочными операциями $C_{ПРРl}$ [руб/ч]. Здесь $l=1,2,\dots, m$ – номер типа транспортного средства.

Требуется найти оптимальный план наименьшей стоимости, обеспечивающий доставку всех клиентских заказов. Время выполнения каждого рейса должно быть не более величины T_{res} .

Для описания транспортно-логистического процесса свяжем каждый подзаказ с тоннажем W_{ij} , фактически поставляемый i -ым ГО с новым «условным» (или «элементарным») отправителем. Каждого такого ГО, поставяющего только тоннаж W_{ij} , закодируем по-новому в соответствии с матрицей (1). Начиная с первой строки, определяем первый отличный от нуля элемент. Будем считать, что он поставляется ГО с номером $f = 1$,

далее находим следующий ненулевой элемент, свяжем его с новым ГО с номером $f = 2$ и т. д. После этого продолжим кодировку новых отправителей, переходя к следующей строке вплоть до окончания просмотра всей матрицы (1). Количество условных ГО N_{OS} равно количеству ненулевых элементов в матрице (1). Каждому грузополучателю присвоим последующие номера $N_{OS}+1, N_{OS}+2, \dots, N_{OS}+N_{КЛ} = n$.

В результате искомым план может быть записан в виде маршрута

$$0 \rightarrow i_1 \rightarrow i_2 \rightarrow \dots \rightarrow i_n \rightarrow \dots \rightarrow 0 \quad (2)$$

объезда n пунктов. Общее количество узлов равно

$$n = N_{OS} + N_{КЛ}.$$

Принятый способ кодировки позволяет разбить весь маршрут и процедуры поиска на естественные элементы транспортно-логистического процесса – загрузки у ГО, перевозки между ГО и получателями грузов, разгрузки у ГП. При кодировке соответственно изменяются массивы координат для узлов маршрута, матриц расстояний и временных ресурсов.

2. Уравнения для поиска оптимальных маршрутов

Введем множество $S_k = \{i_1, i_2, \dots, i_l=f, \dots, i_k\}$, составленное из k произвольно выбранных узлов, и узел i , лежащий вне этого множества. Будем рассматривать два типа маршрутов:

$$i \neq 0 \rightarrow S_k \rightarrow 0, \quad i = 0 \rightarrow S_k \rightarrow 0,$$

проложенных из узла i через множество S_k в конечный нулевой узел. Введем для узла $i \neq 0$ в параметр состояния

$$S = (i, l, j, t, S_k)$$

величины: $l = 1, 2, \dots, m$ – тип БЛА, который находится в узле на маршруте, $j = 0, 1, \dots$ – остаточный свободный ресурс грузоподъемности, которым располагает БЛА при вылете из i -ого узла, $t = 0, 1, 2, \dots$ – остаточный ресурс времени. Эта величина означает тот запас времени, который остается у БЛА, находящегося на маршруте в i -ом узле, до того момента, когда отводимый на весь рейс ресурс T_{res} будет израсходован.

Введем соответственно два типа целевых функций: $F_{k+1}(i, l, j, t, S_k)$ – стоимость (длину) кратчайшего маршрута, при условии, что из узла i будет выходить БЛА l -того типа, имеющее свободный ресурс грузоподъемности $j = 0, 1, 2, \dots$ остаточный ресурс времени t , и $F_{k+1}(0, S_k)$ – стоимость (длину) кратчайшего маршрута. Функция $F_{k+1}(0, S_k)$, при условии, что множество S_k охватывает все множество узлов, представляет собой стоимость искомого оптимального маршрута.

Эти функции удовлетворяют следующим уравнениям:

$$F_{k+1}(i, l, j, t, S_k) = \min \{ [C_{lPif} + C_{ПРР} T_{ff} + F_k(f, l, j \pm Q_f, t - T_{if} - T_{ff}, S_k \setminus f)]; C_{lPio} + F_{k+1}(0, S_k) \}, \quad (3)$$

$$F_{k+1}(0, S_k) = \min \{ C_{0l} + C_{lPof} + C_{ПРР} T_{ff} + F_k(f, l, G_l - Q_f, T_{res} - T_{of} - T_{ff}, S_k \setminus f) \}. \quad (4)$$

Условия минимизации в уравнениях (3), (4), вычислительные алгоритмы для нахождения оптимальных маршрутов, а также возникающие в процессе прокладки ограничения – те же, что и рассматривались ранее в [1,2].

4 Беспилотные ЛА как параллельный канал доставки до двери (ДД) в сетях мультимодальных грузовых операторов

Мультимодальный транспортный оператор (МТО) имеет в регионе грузовой терминал, на котором грузы принимаются от местных грузоотправителей (ГО) для дальнейшей перевозки по транспортной сети МТО и осуществляется развозка прибывших грузов местным грузополучателям (ГП). Традиционный способ решения этих задач – курьерская автомобильная перевозка. Компания МТО использует либо собственный парк автомобилей, либо заключает договор на ТЭО с местным автомобильным экспедитором (автотранспортной компанией). Обычная вертолетная доставка может быть дорогой и не эффективной для перевозок мелких партий грузов (посылок, почты). Целесообразной является применение беспилотных ЛА (БЛА).

Схема реализации доставки с БЛА. Местный терминал выделяет площадку («аэродром» - АЭД) для размещения, хранения, приема и отправления БЛА. Эта площадка может располагаться на территории основного терминала МТО или в непосредственной близости от терминала. В последнем случае необходимо дополнительно связывать аэродром с основным терминалом автомобильным маршрутом. Авиационные БЛА-грузы размещаются на складе временного хранения (СВХ). При планировании маршрута фрагмент $0 \rightarrow i$ понимается как начало рейса - забор груза из ячейки СВХ и загрузка на борт БЛА. Обратный фрагмент $i \rightarrow 0$ означает окончание рейса и разгрузку доставленного груза на СВХ аэродрома.

Используются три основных типа маршрутов:

- развозочные маршруты грузов, прибывших на аэродром, по адресам конечных грузополучателей ОМП;
- маршруты забора грузов у грузоотправителей ОМП и завозки их на аэродром с целью дальнейшей их отправки по транспортно-терминальной сети ОМП;
- комбинированные маршруты, сочетающие маршруты забора грузов ГО и развозки грузополучателям.

Применяемые методы планирования маршрутов зависят от соотношения объемно-весовых характеристик грузов, и грузоподъемности и времени полета БЛА.

Для мелких партий грузов (почтовой корреспонденции), суммарная масса которых много меньше грузоподъемности БЛА, все три типа маршрутов отвечают требованиям классической задачи коммивояжера – задаче о нахождении кратчайшего маршрута объезда n пунктов посещения. Будет ли маршрут комбинированным или нет, это не имеет значения для его нахождения. Множество пунктов посещения включает как грузоотправителей, так и грузополучателей. Грузовой отсек может быть только разделен с целью сепарации отдельных отправок на отделения грузоотправителей и грузополучателей. Служащий, принимающий или отправляющий грузы на маршруте, будет иметь доступ ко всем, находящимся на борту грузам, что повышает его степень ответственности.

При ограничениях на время выполнения рейсов, обусловленных, например, необходимостью подзарядки аккумуляторов БЛА, план доставки будет состоять из нескольких рейсов, которые по усмотрению компании могут выполняться все тем же БЛА или несколькими БЛА одновременно. Для планирования маршрутов та-

кого типа может быть использована программа RouteMasterComT. Примеры ее использования приведены в [1].

В других случаях, когда требования к сохранности отправок повышаются или когда массу и габариты грузов необходимо учитывать, в грузовом отсеке под каждое отправление выделяется отдельная ячейка. Количество ячеек определяет грузоподъемность БЛА. Разнообразие типов маршрутов определяется видом матрицы тоннажа (1).

Для маршрутов развозки из аэродрома матрица тоннажа (1) имеет вид строки

$$W = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{ГП}). \quad (5)$$

Здесь $Q_i = 1, 2, \dots$ означают количество ячеек, которое нужно выделить на борту для размещения грузов i -ым ГП, единственным грузоотправителем является аэродром, нулевым пунктом – склад временного хранения (СВХ) грузов для БЛА. Для маршрутов завоза матрица (1) имеет вид столбца

$$W = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{ГО})^T, \quad (6)$$

представленного здесь в транспонированном виде (знак «Т»), единственным грузополучателем является аэродром $Q_i = 1, 2, \dots$ означают количество ячеек, которое нужно выделить на борту для размещения грузов i -ого ГО.

Комбинированные маршруты имеют прямоугольную матрицу

$$W = \left(\begin{array}{ccc|c} Q_1 & \dots & & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ 0 & \dots & & Q_{ГП} \end{array} \right), \quad (7)$$

содержащую на первой строке грузы маршрутов развозки и в последнем столбце грузы завоза.

В рассмотренной в п. 1 модели и разработанной компьютерной программе существенным ограничением является условие забора всех грузов для ГП (здесь аэродрома) за один рейс перед доставкой на аэродром. При большом числе грузоотправителей и ограниченной грузоподъемности БЛА это условие не выполняется. Доставка за один рейс становится физически невозможной.

Для того, чтобы избавиться от этого ограничения необходимо заменить последний столбец матрицы (7) на диагональную подматрицу, расположенную ниже первой строки. На диагонали указывается количество грузов для завоза на аэродром, грузополучателем будет являться один и тот же пункт – аэродром. Решение задачи оптимизации даст распределение доставляемых грузов по рейсам и сочетание их с развозкой грузов.

4 Авиакомпания (предприятие) - оператор беспилотных авиaperезовок

В отличие от обычных авиакомпаний авиапредприятие (АП) реализует отдельный вид бизнеса – доставку партий грузов с помощью БЛА. Авиапредприятие помимо эксплуатации парка БЛА владеет аэродромом, на котором располагаются службы, выполняющие функции, аналогичные наземным аэропортовым службам обычного аэропорта:

- склад временного хранения грузов и БЛА (типа контейнера или малого ангара);

- оператор(ы) управления БЛА, которые выполняют функции хендлингового отдела (бортовых грузчиков), осуществляющих загрузку грузового отсека БЛА, выгрузки из него прибывающих грузов и доставки на СВХ аэродрома; управления полетами БЛА, включая и контроль за передачей и приема грузов в промежуточных пунктах посадки;

- служба приема заказов на беспилотную доставку (тот же оператор, его компьютер) – принимает заказы от основного заказчика и от местных клиентов;

Оператор после расчета маршрута доставки, осуществляет ввод полетного задания - маршрута полета БЛА.

Беспилотник может иметь отдельный «негрузовой» отсек только для сбора документов. В этом отсеке будут собираться аналогичные документы, собранные из других площадок – капитанская почта.

Сеть аэродромов представляет собой сеть площадок, расположенных на территории обслуживаемого региона, на которых будет приниматься груз, доставленный БЛА и загружаться в отсек БЛА отправляемые грузы. Каждая площадка обслуживается сотрудником, подготовленным для приема и отправления БЛА, загрузки-выгрузки грузов. Сотрудник отвечает также за доставку грузов конечному грузополучателю, включая и оформление транспортных документов.

Для повышения безопасности доставки сотрудник получает от оператора БЛА код - ключ грузового отсека, который дает возможность ему открывать только предназначенный ему отсек.

Схемы доставки, реализуемые БЛА - авиакомпанией. Авиапредприятие может располагаться на территории или в непосредственной близости от основного регионального аэропорта, который принимает пассажирские воздушные суда, включая и вертолеты. В этом случае, взаимодействуя с пилотируемой авиацией, БЛА выполняют те же функции по доставке до двери мелких партий грузов, как и в рассмотренном выше случае доставки от грузового терминала мультимодального перевозчика. Соответствующие маршруты доставки планируются с помощью программного комплекса по исходной матрице тоннажа вида (5) – (7).

Множество реализуемых маршрутов БЛА дополняется типовыми маршрутами, характерными для транспортно-экспедиционных компаний, организующих автомобильные перевозки. Такого типа маршруты формируются на базе заказов типа «1ГО- 1ГП». Объем заказа определяется числом ячеек, выделяемых на БЛА для размещения грузов. В этом случае матрица тоннажа (1) представляет собой квадратную диагональную матрицу, по диагонали которой расположены объемы Q_i каждого заказа.

Формируемые маршруты будут зависеть от соотношения объемов заказов Q_i и грузоподъемности $S_{\text{БЛА}}$. Если эти величины сопоставимы и исключается дозагрузка на маршруте БЛА, маршрут будет содержать последовательные доставки отдельных заказов, упорядоченные оптимальным образом с точки зрения минимума стоимости рейсов. Если же объемы заказов допускают дозагрузку на маршруте БЛА, то оптимальные маршруты будут соединять фрагменты участков забора

грузов от нескольких ГО и доставки грузов нескольким грузополучателям.

В том случае, когда развозка клиентских грузов сочетается с заказами на доставку грузов от аэродрома и обратную доставку на аэродром, то вид матрицы тоннажа изменится. Она формируется из отдельных блоков (5) - (7), дополненных диагональной подматрицей. Оптимальный маршрут будет комбинировать фрагменты забора и развозки грузов из аэродрома, перевозки между заказчиками по типу «1ГО-1ГП» и доставки на аэродром.

Ожидаемая структура маршрута:

Заезд на АЭД за грузом, загрузка нескольких ячеек (отправлений), развозка по ГП, после образования свободных ячеек заезд к ГО, их заполнение и т.д., а в конце - заезд к клиенту (АЭД) и разгрузка окончательная – доставка грузов всех ГО на АЭД.

5. Обслуживание сети медпунктов (поликлиник) БЛА

Сеть медпунктов (или поликлиник) в труднодоступной местности делает заказ местному БЛА-оператору на перевозку биопрепаратов (образцы крови) для биохимического анализа и доставки в центральной лаборатории. Результаты анализа могут высылаться электронной почтой или размещаться на портале Госуслуг. Однако во многих случаях требуется официальный бумажный документ, заверенный печатями. В таком случае возникают обратные грузопотоки для БЛА. Обратные перевозки по линии «биологическая лаборатория - медпункт» требуются для срочной доставки отдельных медикаментов или лекарств.

В данной задаче медпункты выступают в двойном виде как грузоотправители биоматериалов и как клиенты (грузополучатели) документации, медикаментов. Биологическая лаборатория является (клиентом, точнее ГП) биоматериалов и грузоотправителем документов в адрес медпунктов.

Аналогичная схема возникает при обслуживании в сети местной аптеки или поликлиники.

При транспортно-логистическом обслуживании БЛА-компанией полученные заказы и соответственно маршруты описываются матрицей тоннажа вида (7). В том случае, если БЛА-оператор обслуживает заказы, получаемые одновременно для нескольких подобных сетей матрица тоннажа расширяется путем комбинации рассмотренных выше матриц. Такая матрица представлена в виде таблицы 1.

Таблица 1.

Матрица тоннажа при одновременном обслуживании двух сетей: биологическая лаборатория (БЛ) и аптека (Ап)

ГО, ГП	Биолаб	ГП(БЛ)	...	Аптека	ГП(Ап)	...
ГО(БЛ)	Q_1	-	-	-	...	-
....	Q_2	-	-	-	-	-
Биолаб	-	Q_1	Q_2	-	-	-
ГО(Ап)	-	-	-	Q_1	-	-
...	-	-	-	Q_2	-	-
Аптека	-	-	-		Q_1	Q_2

6. Программный комплекс «SupKIRouteMaster». Планирование доставки грузов с помощью БЛА. Примеры

Описанные модели и алгоритмы положены в основу компьютерного программного комплекса «SupKIRouteMaster». Рассмотрим примеры применения.

Пример 1. БЛА-авиакомпания –оператор доставки в региональной сети.

Проводились расчеты планов БЛА-доставки для n=5 заказов, каждый из них в адрес одного грузополучателя. Расположения ГО и ГП моделировались с помощью датчиков случайных чисел в виде равномерного распределения на квадрате [-a, a], a =25 км. Скорость БЛА v=40 км/час. Матрица тоннажа Вимела вид единичной матрицы размера 5×5. Грузовместимость БЛА варьировалась от 5 до 1 ячейки размещения груза.

Сравнивались различные маршруты, оптимальные по критерию минимума длины маршрута в км. Первый маршрут был построен по принципу «1 заказ – 1 рейс» БЛА. Для выполнения заказов потребовалось пять рейсов БЛА, суммарная длина дистанции 329 км. На рис. 1 представлен оптимальный однорейсовый маршрут БЛА, длина пролета 185 км. Кодировка пунктов посещения следующая: i =1,2,...5 – код грузоотправителей (адресов забора грузов), (i+5) – код грузополучателя i-ого ГО (адреса доставки). Маршрут состоит из нескольких подряд заездов к ГП (здесь не более двух) для забора грузов, разделяющихся между собой пунктами разгрузки. Алгоритм оптимизации пролета определяет оптимальный порядок их чередования. При запуске программы вводилось значение грузоподъемности Gmax =5 ячеек в расчете на то, что (при возможном случайном расположении пунктов посещения) оптимальный маршрут может состоять из 5 подряд ГО, а далее будет содержать развозки 5 грузополучателям. Однако результат расчета показал, что такая грузоподъемность излишняя, а достаточно было использовать БЛА с G =2 ячейки.

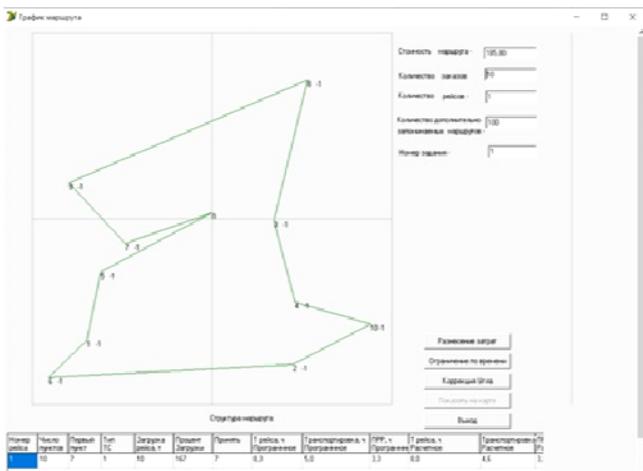


Рис. 1

Рассчитывался маршрут доставки при использовании БЛА минимальной грузоподъемности G =1 ячейка. Ограниченность ГВМ определила логику маршрута. Прилет БЛА подряд в адреса нескольких ГО исключен. Забор груза у последующего ГО возможен только после разгрузки груза предыдущего грузоотправителя. График с оптимальным маршрутом в этом случае получа-

ется сильно изрезанным с самопересечениями, его суммарная длина равна 222 км.

Рассчитывались маршруты с учетом ограничения на ресурс T_{рес} времени полета БЛА. На рис. 2 представлен график маршрута при значении T_{рес} = 5 час. Маршрут содержит два рейса, в каждом из которых ГО и ГП распределены оптимальным образом. Суммарная длина маршрутов полета – 230 км. Если уменьшить отводимый ресурс до величины T_{рес} = 4 час, то маршрут будет состоять из трех рейсов с суммарной длиной 237 км.

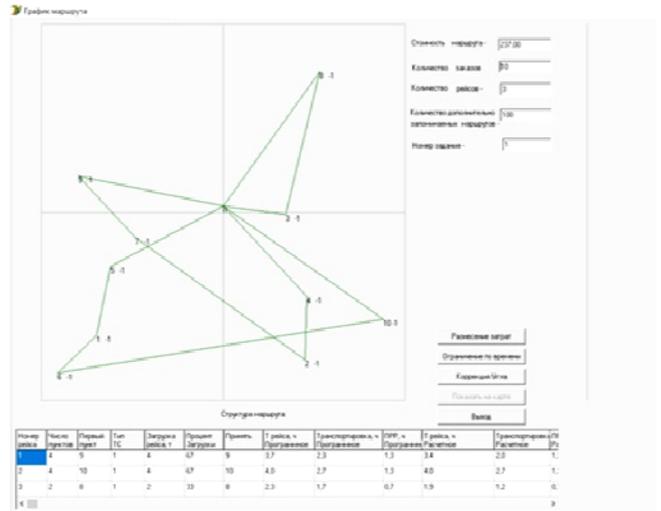


Рис. 2

Пример 2. Маршруты БЛА - доставки до двери в сети МТО.

Задания на БЛА-доставку от мультимодального оператора содержали два заказа на развозку из аэродрома в пределах региона и завоз на АЭД (терминал МТО) от трех грузоотправителей. Матрица тоннажа заказов приведена в табл. 2.

Таблица 2.

Матрица тоннажа БЛА доставки из аэродрома.

ГО, ГП	ГП ₁	ГП ₂	АЭД
АЭД	1	1	-
ГО ₁	-	-	1
ГО ₁	-	-	1
ГО ₁	-	-	1

Элементы матрицы означают количество ячеек грузоподъемности БЛА необходимое для перевозки. Их суммарное количество пять равно максимальному требуемому ресурсу грузоподъемности беспилотника.

План доставки, сформированный по принципу «ГП -1 рейс БЛА», включает три рейса. Суммарная длина маршрута полета равна 203 км. Требуемый ресурс времени на доставку равен 4 час. Оптимальный маршрут без ограничений по времени полета состоит из одного рейса. Его длина равна 124 км, время выполнения T =7 час. Если время доставки уменьшить до значения T =5 час, то оптимальный маршрут будет содержать два рейса БЛА, один из которых включает только заказы по вывозу грузов из АЭД, а второй – заказы доставки на аэродром. Суммарная длина маршрутов полета -141 км.

Заключение

Доставка мелких партий грузов с помощью беспилотных летательных аппаратов является сравнительно новым сектором транспортного бизнеса. В условиях ограниченной транспортной доступности она является более экономичным способом доставки по сравнению с вертолетной перевозкой. Грузовые БЛА-операторы, осуществляя различные виды транспортно-логистического обслуживания, работают с большим количеством разнообразных по своему характеру заказов на перевозку. Предложенная здесь единая форма описания заказов, включает множество различных моделей важных в практическом плане. Описанные оптимизационные модели и алгоритмы позволяют осуществлять оптимальное планирование всего транспортно-логистического процесса одновременно по всем заказам.¹

Список источников

1. Палагин Ю.И., Глинский В.А., Мочалов А.И. Интермодальные транспортно-логистические процессы. Экспедирование, технологии, оптимизация. - СПб.: Издательство «Политехника», 2019. – 366 с.
2. Палагин Ю.И. Оптимальное планирование маршрутов доставки мелких отправок в сложных структурах клиентских заказов. ВИНТИ, Транспорт: наука, техника, управление, 2020, № 8. С.14-19.
3. Гусев С.А., Маросин В.С. Интеллектуальные модели разработки маршрутов перевозки мелкопартионных грузов. Известия Тульского государственного университета. Технические науки – 2015. № 5. ч.1. - С. 69-76.
4. Майкл Хахслер и Курт Хорник, TSP - Инфраструктура для проблемы коммивояжера, Журнал статистического программного обеспечения, 22 (2), 2007, с. 1-21.
5. Стейси А.В., Энн М. Кэмпбелл, Барретт У. Томас. Вероятностная проблема коммивояжера с временными окнами. Европейский журнал по транспорту и логистике. – 2013. – Вып. 1. Том 2. с. 89-107.
6. <https://habr.com> - статья «Обзор мирового опыта коммерческой доставки грузов с помощью беспилотников» 2017 г.
7. <https://hi-news.ru/technology/v-anglii-testiruyut-novuyu-sistemu-dostavki-gruzov-bespirotnymi-dronami.html> - статья «В Англии тестируют новую систему доставки грузов беспилотными дронами», Артем Батоков, 2014 г.

References

1. PalaginYu.I., Glinsky V.A., Mochalov A.I. Intermodal transport and logistics processes. Forwarding, technology, optimization. - St. Petersburg: Publishing house "Polytechnic", 2019. – 366 p.
2. PalaginYu.I. Optimal planning of delivery routes for small shipments in complex customer order structures. VINITI, Transport: Science, Technology, Management 2020 No. 8, pp. 14-19.

3. Gusev S.A., Marosin V.S. Intelligent models for the development of routes for the transportation of small-batch goods. Proceedings of Tula State University. Technical Sciences -2015. - No 5. part 1. - С. 69-76.

4. Michael Hahsler and Kurt Hornik, TSP - Infrastructure for the Traveling Salesperson Problem, Journal of Statistical Software, 22(2), 2007, pp. 1-21.

5. Stacy A.V., Ann M. Campbell, Barrett W. Thomas. The probabilistic travelling salesman problem with time windows. EURO Journal on Transportation and Logistics. – 2013. – Issue 1. Vol. 2, pp 89-107.

6. <https://habr.com> - article "Overview of the world experience of commercial delivery of goods using drones", 2017.

7. <https://hi-news.ru/technology/v-anglii-testiruyut-novuyu-sistemu-dostavki-gruzov-bespirotnymi-dronami.html> - article "In England they are testing a new cargo delivery system with unmanned drones", Artem Batogov, 2014.

Информация об авторах

Палагин Ю.И. – доктор техн. наук, профессор на кафедре «Интермодальные перевозки и логистика». Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации.

Зверева А.С.– выпускник СПбГУ ГА, кафедра «Интермодальные перевозки и логистика». Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации.

Information about the author

PalaginYu.I. - Doctor of Technical Sciences, Professor of St. Petersburg State University of Civil Aviation, Department. Intermodal transport and logistics;

Zvereva A.S. - student of St. Petersburg State University of Civil Aviation, department Intermodal transport and logistics.

Статья поступила в редакцию 15.04.2022, одобрена после рецензирования 20.05.2022, принята к публикации 25.05.2022.

The article was submitted 15.04.2022, approved after reviewing 20.05.2022, accepted for publication 25.05.2022.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors' contribution: All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that there is no conflict of interest.