

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ С УЧЕТОМ КОДА IP В ЗАДАЧЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ

Саломатин А. А.<sup>1</sup>

(ФГБУН Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

*Статья посвящена разработке метода управления беспилотной авиационной системой с учетом кода IP в задаче транспортировки грузов. Проводится короткий обзор работ, посвященных методам и алгоритмам группового управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) при транспортировке грузов. Предлагаются новые математические модели и метод управления гетерогенной группой БПЛА в задаче транспортировки грузов. Основой для их разработки служит учет кода IP для формирования метеорологических ограничений маршрутной сети. Первая и вторая характеристические цифры кода IP позволили определить ограничения влияния дождя, снега и снежной крупы. Отмеченные явления могут нести серьезные последствия для БПЛА, осуществляющих полёт, приводить их к различного рода неисправностям. Лицо, принимающее решение (ЛПР), может осуществлять выбор БПЛА для выполнения миссии с необходимыми показателями цифр кода IP, тем самым осуществляя реконфигурацию беспилотной авиационной системы (БАС), и формировать более эффективные с точки зрения управления решения. Проводится вычислительный эксперимент, подтверждающий данное утверждение. Для рассмотренных районов применение нового метода, учитывающего код IP для БПЛА, позволяет улучшить оценку эффективности по сравнению с существующим методом.*

Ключевые слова: беспилотная авиатранспортная система, беспилотный летательный аппарат, грузоперевозки, управление беспилотной авиатранспортной системой, код IP.

### 1. Введение

Необходимость совершенствования процессов организации и управления транспортно-экспедиционной деятельностью, необходимостью обеспечения качества транспортно-логистических услуг для грузоотправителей, повсеместной цифровизацией

---

<sup>1</sup> Александр Александрович Саломатин, м.н.с. (karateka30@mail.ru).

транспортной отрасли в соответствии с программой развития положений цифровой экономики Российской Федерации до 2035 г. делает актуальным создание интеллектуальных транспортных систем с использованием современных информационно-телекоммуникационных технологий и глобальной навигационной системы [12, 14].

Проводятся исследования в области оптимизации управления транспортно-логистической деятельностью и автоматизации на основе интеллектуальных систем, показывающие, что для транспортировки грузов перспективным становится применение беспилотных авиационных систем (БАС), входящих в состав интеллектуальных транспортных систем. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для доставки посылок преодолевает ограничения пространства на местности, сокращает рабочую силу потребление, является более дешевым и гибким и, таким образом, компенсирует недостатки традиционной логистики. В горных районах и сельской местности, где не хватает людских ресурсов, беспилотные летательные аппараты также могут быстро доставлять грузы.

Для управления БАС в задаче транспортировки грузов эффективным является применение математических моделей, методов и алгоритмов, обеспечивающих оптимальные решения при выполнении поставленных грузоперевозок. Повышение эффективности методов и алгоритмов достигается в том числе за счет учета метеорологических ограничений.

В работе [7] развивается подход к формированию наискорейших маршрутов полета легкого беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в поле постоянного ветра на основе решения разновидностей задачи коммивояжера и учитываются скорость и направление ветра. Данные метеорологические характеристики также учитываются в работе [8], где проводится сравнительный анализ нескольких вариантов разработанного авторами программно-алгоритмического обеспечения решения задач маршрутизации полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра.

В работе [20] проводится анализ моделей и алгоритмов задачи маршрутизации транспортных средств. В [22] проводится анализ применения муравьиного алгоритма для оптимизации

в задаче маршрутизации с временными окнами. В [18] проводится анализ применения генетического алгоритма для оптимизации в задаче маршрутизации. Несмотря на то, что маршрутизация используется в задаче транспортировки грузов, в данных работах не учитываются метеорологические характеристики.

Работа [23] посвящена разработке алгоритмов маршрутизации дронов для БАС с учетом трех основных аспектов маршрутизации дронов: планирования траектории, зарядки и безопасности, где учитывается наличие экстремальных погодных условий (сильный ветер, снег, дождь), но без детального анализа и без предположений о полете БПЛА в таких условиях.

Работа [1] хоть и не посвящена напрямую транспортировке грузов, но отмечает возможные критические отказы и их последствия, возникающие в ходе проведения испытаний беспилотных летательных аппаратов военного и специального назначения. Учитывается вероятность обледенения, наличие дождя, снега, града, тумана и грозы, вероятность удара молнии в БПЛА, скорость и направление ветра.

Примечательна работа [5], в которой проводится анализ открытых литературных источников по вопросам эксплуатации и практического применения БПЛА в условиях воздействий факторов внешней среды. В качестве метеорологических характеристик рассматривают высоту нижней границы облачности, метеорологическую дальность видимости, скорость ветра, наличие явления погоды (гроза, обледенение, болтанка БПЛА).

Скорость ветра, наличие тумана, дождя, снега, температура, вероятность обледенения, направление ветра учитывается в работе [6], где исследуется влияние метеоусловий на полет БПЛА серии SUPERCAM и вырабатываются рекомендации по управлению в зависимости от метеоусловий.

Анализ эффективности транспортировки компонентов крови с применением БПЛА, представляющей собой транспортную задачу, представлена в [9]. В работе упоминаются две метеорологические характеристики, влияющие на полет БПЛА: температура местности и скорость ветра.

В зарубежных исследованиях [15, 17], посвященных поиску решений для транспортной задачи и её подзадач, метеорологиче-

ские характеристики и вовсе отсутствуют: изначально предполагается, что доставку грузов возможно осуществить при заданных условиях.

Проведенный анализ литературы показывает, что при разработке метода управления БАС в задаче транспортировки грузов не учитываются коды IP применяемых БПЛА, значения которых могут влиять на безопасность полетов БПЛА при дожде, выпадении снега и снежной крупы.

Стоит отметить, что в рамках одной климатической зоны могут применяться БПЛА с разными показателями кода IP. Так, Zipline использует дроны нескольких типов для осуществления доставок рецептов, лекарств, биоматериалов в Юте, Арканзасе, Кот-д'Ивуаре, Нигерии, Гане, Кении, Руанде, Японии [10]. Первый тип дронов применяется для ультраточной доставки (радиус 16 км), а второй – с большой дальностью действия и большой площадью покрытия (радиус 100 км). Дроны обладают различными летно-техническими показателями и в зависимости от условий задачи (расстояния, массы груза, погодных условий и др.) могут быть выбраны для доставки конкретных грузов.

При этом компаниям свойственно расширять свои зоны влияния, так что парк БПЛА, имеющихся в наличии у компании, также по рациональным причинам может увеличиться в будущем. Более того, могут появиться новые компании, осуществляющие доставки грузов с различными кодами IP в рамках одной климатической зоны. Наличие большого парка БПЛА позволяет производить реконфигурацию используемой беспилотной авиационной системы для транспортировки грузов и повышать эффективность транспортировки грузов. Также обслуживание дронов разных типов может различаться, а их нерациональное использование может приводить к затратам, поэтому большое значение в транспортировке грузов также имеет формирование эффективной группы БПЛА для транспортировки грузов в выбранные зоны.

Цель текущей работы заключается в повышении эффективности транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА за счет разработки метода управления.

## **2. Моделирование задачи транспортировки грузов с помощью группы беспилотных летательных аппаратов**

Прежде чем перейти к описанию применения кода IP в транспортировке грузов с помощью группы БПЛА, представим общую постановку задачи транспортировки грузов с помощью группы БПЛА [4].

Пусть имеется некоторое количество потребителей материально-технических средств, распределенных в пространстве. От всех или некоторых потребителей в текущий момент времени имеются заявки на доставку материальных средств. Имеется центр обработки заявок, в задачи которого входит прием заявок на доставку грузов, их обработка, планирование процессов выполнения доставок и контроль их осуществления. На местности расположены пункты хранения грузов (склады), которые характеризуются местоположением (координатами) и объемами хранящихся в текущий момент времени грузов различных типов. Каждый груз в источнике, помимо типа, характеризуется габаритными размерами, массой, условиями хранения и транспортировки, приоритетностью доставки и/или другими свойствами. Транспортные средства (БПЛА) базируются в местах расположения грузов, т.е. в источниках. Каждое транспортное средство характеризуется грузоподъемностью, объемом перевозимых грузов, коэффициентами использования грузоподъемности, скоростью движения, временем подготовки к повторному применению и/или другими параметрами. Заданы параметры инфраструктуры. Также имеется информация о возможности или невозможности различных пунктов принимать и обслуживать БПЛА различных типов. Известна метеорологическая обстановка, которая характеризуется осадками, направлением и силой ветра, вероятностью возникновения неблагоприятных погодных условий и/или др. Имеется маршрутная сеть воздушного транспорта, заданная в виде сети маршрутов с привязкой к координатам. Предполагается, что для каждого маршрута могут быть рассчитаны затраты, связанные с полным временем полета БВС различных типов. Требуется разработать сценарий транспортировки грузов из источников в стоки так, чтобы удовлетворить потребности стоков. При

этом сценарий должен быть эффективным по ряду показателей, среди которых могут быть время доставки, затраты ресурсов, степень удовлетворения потребностей, рациональность загрузки БПЛА и др. На основе разработанного сценария сформировать множество миссий и набор полетных заданий.

Под источниками понимаются хабы, а под стоками – пункты назначения. Терминология предложена для авиоперевозок в [13].

С учетом приведенного содержательного описания, формализация задачи транспортировки грузов может быть представлена следующим образом:

$$(1) E(X, R, T^S, T^D, Z) \rightarrow \max, X \in X_F,$$

где  $E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$  – эффективности сценариев по выбранному множеству показателей;  $X$  – оптимальный сценарий;  $R$  – маршрутная сеть;  $T^S$  – потребности груза в источниках;  $T^D$  – потребности груза в стоках;  $X_F$  – множество допустимых сценариев.

Полученная оптимизационная задача фактически представляет собой не одну, а множество взаимосвязанных задач поиска, оптимизации и выбора решений. Состав задач во многом зависит от фактического набора данных, задающих параметры БАС, но в общем случае он может быть сведен к следующему набору:

- 1) управление маршрутной и транспортной сетью;
  - а) построение/актуализация маршрутной сети;
  - б) построение/актуализация транспортной сети;
- 2) формирование множества сценариев транспортировки грузов;
  - в) формирование плана транспортировки грузов;
  - г) выбор транспортных средств с заданными характеристиками;
  - д) формирование плана загрузки транспортных средств;
  - е) оптимизация размещения грузов на БАС;
  - ж) распределение транспортных средств по маршрутам;
- 3) оценка и выбор оптимального сценария.

В текущей работе при решении задачи транспортировки грузов наибольшее внимание уделяется задачам построения маршрутов.

рутной сети, выбора транспортных средств с заданными характеристиками, разработке для данных задач новых методов и алгоритмов с учетом кода IP.

### **3. Учет кода IP при транспортировке грузов с помощью группы беспилотных летательных аппаратов**

«Код IP обозначает степень защиты, обеспечиваемых оболочкой, от доступа к опасным частям, попадания внешних твердых предметов, воды, а также для предоставления дополнительной информации, связанной с такой защитой» [3]. Он состоит из двух характеристических цифр, а также двух дополнительных букв при необходимости. Первая цифра кода обозначает защиту оборудования от проникновения твердых частиц. Вторая цифра кода обозначает защиту оборудования от вредного воздействия в результате проникновения воды. Первая дополнительная буква связана с защитой людей от доступа к опасным частям. Вторая дополнительная буква связана со вспомогательной информацией, относящейся к высоковольтным аппаратам, состоянию движения во время испытаний защиты от воды, состоянию неподвижности во время испытаний защиты от воды.

У каждого БПЛА есть встроенная защита от воды, которая технически прописана значением второй характеристической цифры кода IP. Связь некоторых значений второй характеристической цифры со степенью защиты от воды показана в таблице 1. Частицы воды содержатся в дожде, могут образоваться при выпадении снега и снежной крупы.

Дождь может привести к различным неисправностям БПЛА:

- прекращение работы элементов БПЛА или всего БПЛА ввиду короткого замыкания в связи с разъемом водой мелких электронных деталей;
- снижение управляемости и стабильности полета БПЛА ввиду ударов капель о пропеллеры;
- затруднение работы навигационных систем и сенсоров БПЛА;

– ухудшение качества съемки для БПЛА с камерой ввиду попадания капель дождя на линзы камеры и наличия капель в воздухе.

Таблица 1. Степень защиты от воды на основе некоторых вторых характеристических цифр кода IP

Вторая характеристическая цифра	Степень защиты	
	Краткое описание	Определение
0	Нет защиты	-
1	Защищено от вертикально падающих капель воды	Вертикально падающие капли воды не должны оказывать вредного воздействия
2	Защита от вертикально падающих капель воды, когда оболочка отклонена на угол до 15 градусов	Вертикально падающие капли воды не должны оказывать вредного воздействия, когда оболочка отклонена на угол до 15 градусов включительно
3	Защита от воды, падающей в виде дождя	Вода, падающая в виде брызг в любом направлении, составляющем угол до 60 градусов включительно с вертикалью, не должна оказывать вредного воздействия
4	Защищено от сплошного обрызгивания	Вода, падающая в виде брызг на оболочку с любого направления, не должна оказывать вредного воздействия

При попадании снежинок на поверхность БПЛА снег может изменять свое состояние с твердого на жидкое, что приводит к неисправности работы элементов, как и в случае с дождем.

Итак, из таблицы 1 следует, что для беспрепятственной работы БПЛА на заданном маршруте при наличии дождя значение второй характеристической цифры должно быть не меньше трёх, чтобы БПЛА и его элементы не выходили из строя.



С другой стороны, снежинки представляют собой твердые частицы и могут не таять [2]. Поэтому при определении ограничений в связи с влиянием снега и снежной крупы важно учитывать также первую характеристическую цифру кода IP для БПЛА. Связь некоторых значений показателя со степенью защиты от внешних твердых предметов представлена в таблице 2.

Таблица 2. Степень защиты от внешних твердых предметов на основе некоторых первых характеристических цифр кода IP

Первая характеристическая цифра	Степень защиты	
	Краткое описание	Определение
0	Нет защиты	–
1	Защищено от внешних твердых предметов диаметром больше или равным 50 мм	Щуп-предмет – сфера диаметром 50 мм – не должен проникать полностью
2	Защищено от внешних твердых предметов диаметром больше или равным 12,5 мм	Щуп-предмет – сфера диаметром 12,5 мм – не должен проникать полностью
3	Защищено от внешних твердых предметов диаметром больше или равным 2,5 мм	Щуп-предмет – сфера диаметром 2,5 мм – не должен проникать ни полностью, ни частично
4	Защищено от внешних твердых предметов диаметром больше или равным 1,0 мм	Щуп-предмет – сфера диаметром 1,0 мм – не должен проникать ни полностью, ни частично

Для исправной работы БПЛА в случае снега и снежной крупы дополнительно учитывается защита от твердых частиц. Из таблицы 2 следует, что для беспрепятственной работы БПЛА на заданном маршруте при наличии снега значение первой характеристической цифры должно быть не меньше четырех, чтобы БПЛА и его элементы не выходили из строя. Такое утверждение следует из того, что диаметр снежной крупы варьируется от 2 до 5 мм.

Значения первой и второй характеристической цифры кода IP учитываются в разрабатываемом методе управления при решении подзадач: построении маршрутной сети и выборе транспортных средств с заданными характеристиками.

Рассмотрим подробнее предлагаемый метод управления БАС с учетом кода IP в задаче транспортировки грузов.

Первым шагом является построение маршрутной сети.

Модель маршрутной сети можно представить следующим образом:

$$(2) \langle S, SP, D, DP, Q, QP, A, AP_1, AP_2, W_1, W_2, I; R \rangle,$$

где  $S, SP$  – множество источников и их характеристик;  $D, DP$  – множество стоков и их характеристик;  $Q, QP$  – множество промежуточных пунктов и их характеристик;  $A$  – множество транспортных средств;  $AP_2$  – множество, содержащее характеристики транспортных средств – первую характеристическую цифру кода IP  $r_{i1}$ , вторую характеристическую цифру кода IP  $r_{i2}$ ;  $AP_1$  – множество, содержащее остальные характеристики транспортных средств;  $I$  – информация о текущем распределении угроз, физико-географических характеристиках местности и другая информация, важная для лица, принимающего решение (ЛПР);  $W_1$  – множество, содержащее информацию о метеорологических характеристиках – скорости и направлении ветра;  $W_2$  – множество, содержащее информацию о метеорологических характеристиках – наличии дождя, наличии снега и снежной крупы;  $R$  – маршрутная сеть с набором характеристик и параметров, определяемых моделью:

$$(3) R = \langle S, D, Q, \Gamma, C, U_1, U_2 \rangle,$$

где  $\Gamma = \{ \Gamma_f \}$  – карта (граф) маршрутов с привязкой к координатам;  $C = \{ \| C_f(A_l, Y_p) \| \}$  – множество матриц, задающее затраты ресурсов из множества  $Y = \{ Y_p \}$  при использовании транспортного средства  $A_l$  на маршруте  $\Gamma_f$ ;  $U_2 = \| U_2(A_l, \Gamma_f) \|$  – матрица дополнительных ограничений маршрутной сети, содержит знания о значениях следующих характеристик: индикатор дождя  $u_{if}^r$  и индикатор снега и снежной крупы  $u_{if}^s$ ;  $U_1 = \| U_1(A_l, \Gamma_f) \|$  – матрица других дополнительных ограничений маршрутной сети.

Следующим шагом алгоритма является построение транспортной сети  $TN$ . Транспортная сеть представляет собой маршрутную сеть, для которой, дополнительно к параметрам модели маршрутной сети, задано текущее распределение расположения транспортных средств в источниках  $V$ , характеристики грузов  $GP$ , величины запасов грузов в источниках  $T^S$ , величины потребностей грузов в стоках (пунктах назначения)  $T^D$ . Модель транспортной сети имеет вид:

$$(3) \langle R, A, V, G, GP, T^S, T^D; TN \rangle,$$

где определения параметров  $R, A, V, G, GP, T^S, T^D$  соответствуют введенным ранее;  $TN$  – построенная транспортная сеть (включающая в себя все перечисленные группы параметров).

После формируется план транспортировки грузов  $Y$ . Определяется, какие маршруты из числа имеющихся в транспортной сети и доступных на текущий момент с учетом состояния последней следует задействовать для транспортировки грузов и какое количество единиц груза каждого типа подлежит транспортировке по выбранным маршрутам, для того чтобы обеспечить выполнение текущих заявок на доставку с минимизацией издержек и/или времени на транспортировку. Обозначим  $y_{k,f}$  – количество единиц груза  $G_k$ , подлежащих транспортировке по маршруту  $\Gamma_f$ . Тогда план транспортировки грузов может быть задан следующим образом:

$$(4) Y = \{y_{k,f} = y(G_k, \Gamma_f) \mid G_k \in G, \Gamma_f \in \Gamma\},$$

где  $\Gamma$  – определенный ранее граф (карта) маршрутов.

Постановка оптимизационной задачи имеет вид:

$$(5) E(Y, TN) \rightarrow \max, Y \in Y_f,$$

где  $TN$  – состояние транспортной сети, определенное путем ее построения на предыдущем этапе;  $E$  – множество целевых показателей, по которым производится оценка эффективности плана транспортировки (суммарные затраты, время и др.).

Далее формируется план загрузки транспортных средств. Для каждого источника  $T$  (пункта, в котором находятся грузы, предназначенные для перевозки) определяется план загрузки транспортных средств  $Z_T$ , определяющий количество единиц груза, транспортируемых по определенным маршрутам на определенных транспортных средствах так, чтобы целевая функция,

представленная некоторым множеством показателей  $E$ , приобрела оптимальное значение (например, степень заполненности БАС). Информационная модель задачи выглядит следующим образом:

$$(6) \langle Z_T, GP_T, Y_T, A_T, AP_T, I_T; Z_T \rangle,$$

где  $Z_T$  – план загрузки транспортных средств, задающий количество единиц груза, транспортируемых по маршрутам, на борту транспортных средств.

План  $Z_T$  определяется из оптимизационной задачи вида

$$(7) E(G_T, GP_T, Y_T, A_T, AP_T, I_T; Z) \rightarrow \max,$$

где  $E$  – множество целевых показателей, по которым производится оценка эффективности плана (приоритетность доставки различных типов грузов, степень заполненности БПЛА, рациональность использования транспортных средств и др.).

Для задачи формирования плана транспортировки грузов из источников (пунктов хранения) в стоки (пункты назначения) можно предложить следующую схему формализации.

Пусть транспортная сеть состоит  $m$  источников ( $A_1, A_2, \dots, A_m$ ),  $n$  стоков ( $B_1, B_2, \dots, B_n$ ) и  $r$  промежуточных пунктов ( $C_1, C_2, \dots, C_r$ ). Предположим вначале, что транспортируемый в данной сети груз является однородным или взаимозаменяемым. В этом случае должны быть заданы величины  $a_i > 0$  запаса груза в источниках  $A_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , объемы потребностей  $b_j > 0$  в грузе в стоках  $B_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ , а также объемы дополнительных потребностей  $c_t$  в грузе в промежуточных пунктах (на складах)  $C_t$ ,  $t = 1, \dots, r$ . При этом если  $c_t > 0$ , то это означает, что на соответствующем складе имеется фактическая потребность в грузе (например, в связи с необходимостью сделать резерв), а  $c_t < 0$  означает, что на складе имеется запас груза (т.е. отрицательная величина дополнительной потребности связана с избытком). В свою очередь  $c_t = 0$  означает, что данный промежуточный пункт является транзитным.

Пусть заданы средние затраты  $d_{it}$  на транспортировку единицы груза из источника  $A_i$  в промежуточный пункт  $C_t$ , а также средние затраты  $q_{ij}$  на транспортировку единицы груза из промежуточного пункта  $C_t$  в сток  $B_j$ .

Пусть в сети может транспортироваться  $p$  видов груза ( $G_1, G_2, \dots, G_p$ ), тогда запасы и потребности различных видов груза будут заданы следующим образом:  $a_{ik} > 0$  – запасы груза  $G_k$  в источниках  $A_i, i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, p; b_{jk} > 0$  – объемы потребностей в грузе  $G_k$  в стоках  $B_j, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, p; c_{tk}$  – объемы дополнительных потребностей в грузе  $G_k$  в промежуточных пунктах  $C_t, t = 1, \dots, r; k = 1, \dots, p$ .

Заданы средние затраты  $d_{itk}$  на транспортировку единицы груза  $G_k$  из источника  $A_i$  в промежуточный пункт  $C_t$ , а также средние затраты  $q_{tjk}$  на транспортировку единицы груза  $G_k$  из промежуточного пункта  $C_t$  в сток  $B_j$ .

Соответственно, переменные задачи будут иметь вид:  $x_{itk}$  – количество единиц груза  $G_k$ , транспортируемого из источника  $A_i$  в промежуточный пункт  $C_t$ ;  $y_{tjk}$  – количество единиц груза  $G_k$ , транспортируемого из промежуточного пункта  $C_t$  в сток  $B_j$ .

С учетом введенных обозначений, оптимизационная модель приобретает следующий вид:

$$(8) \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^r \sum_{k=1}^p d_{itk} x_{itk} + \sum_{t=1}^r \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p q_{tjk} y_{tjk} \rightarrow \min,$$

при ограничениях:

$$(9) \begin{cases} \sum_{t=1}^r x_{itk} = a_{ik}, & i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, p; \\ \sum_{t=1}^r y_{tjk} = b_{jk}, & j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, p; \\ \sum_{i=1}^m x_{itk} - \sum_{j=1}^n y_{tjk} = c_{tk}, & t = 1, \dots, r; k = 1, \dots, p; \\ x_{itk} \geq 0, & i = 1, \dots, m; t = 1, \dots, r; k = 1, \dots, p; \\ y_{tjk} \geq 0, & t = 1, \dots, r; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, p. \end{cases}$$

Эффективность плана транспортировки грузов может оцениваться не суммарными издержками, а временем, затрачиваемым на его реализацию. В этом случае план транспортировки оценивается по времени прохождения транспортным средством наиболее продолжительного маршрута.

Для решения задачи поиска плана транспортировки, оптимального по времени, необходимо иметь информацию о длительности прохождения каждого участка маршрутной сети транспортным средством, т.е. множество  $L = \{l_{ij}\}$ , где  $l_{ij}$  – время, затрачиваемое транспортным средством на перелет между пунктами  $i$  и  $j$  (данная величина может рассчитываться как сумма вре-

мени выполнения операций, необходимых для подготовки к перелету, а также после завершения перелета, включая операции погрузки и разгрузки).

Следующим шагом является выбор транспортных средств с заданными характеристиками, где для заданного маршрута транспортировки осуществляется подбор БАС с определенным набором технических и эксплуатационных параметров с учетом характеристик транспортируемого груза, распределения угроз и др. При выборе транспортных средств с заданными характеристиками кода IP модель можно представить следующим образом:

$$(10) \langle G_F, GP_F, A_F, AP_{1F}, AP_{2F}, U_{1F}, U_{2F}, H_{1C}, H_{2C}; C^*, D^* \rangle,$$

где  $G_F, GP_F$  – множество грузов и их характеристик для заданного маршрута  $F$ ;  $A_F$  – множество транспортных средств для маршрута  $F$ ;  $AP_{2F}$  – множество, содержащее характеристики транспортных средств – первую характеристическую цифру кода IP  $r_{i1F}$ , вторую характеристическую цифру кода IP  $r_{i2F}$ ;  $AP_{1F}$  – множество, содержащее остальные характеристики транспортных средств;  $U_{2F}$  – матрица дополнительных ограничений маршрутной сети, содержащая сведения об индикаторе дождя  $u_{iF}^r$ , индикаторе снега и снежной крупы  $u_{iF}^s$ ;  $U_{1F}$  – матрица других дополнительных ограничений маршрутной сети;  $H_{2C}$  – множество требований к характеристикам транспортных средств, первой характеристической цифре кода IP, второй характеристической цифре кода IP;  $H_{1C}$  – множество требований к другим характеристикам транспортных средств;  $C^*$  – множество критериев оценки альтернативных вариантов транспортных средств и/или характеризующих их параметров (формируется на основе множества требований  $H_{1C}$  и  $H_{2C}$ );  $D^*$  – решающее правило, задающее некоторую процедуру (алгоритм) оценки и выбора альтернативных вариантов с учетом множества критериев.

Вне зависимости от смыслового содержания конечной целью подобного процесса является предъявление ЛПП проранжированного множества альтернативных технических решений. На основе анализа предъявленного множества дальнейшими действиями ЛПП могут быть изменение исходных условий и повторение процесса, усечение множества, выбор среди допустимых

альтернатив наиболее предпочтительной с последующей ее реализацией. Основу для формализации этапов данного алгоритма составляет математический аппарат теории нечетких множеств, базирующийся на обобщении классического понятия множества для более корректного и полного описания объектов с нечеткими границами.

Предпоследним шагом является распределение транспортных средств по маршрутам, в результате которого с учетом периода планирования  $T_H$  формируется сценарий  $X$  транспортировки грузов в виде распределения транспортных средств по маршрутам с заданием плана загрузки и размещением грузов на БАС. Поиск сценария осуществляется решением оптимизационной задачи. Критерий оценки управления транспортно-логистической деятельностью  $E$  может различаться и устанавливается лицом, принимающим решение. Ими могут быть качество, экономичность, действенность, производительность, прибыльность, результативность и др. критерии, а также их комбинации. Модель можно представить следующим образом:

$$(11) \langle R, Y, A, AP, Z, U, C, T_H; X \rangle,$$

где  $R$  – маршрутная сеть;  $Y$  – план транспортировки грузов;  $A$  – множество транспортных средств;  $AP$  – наборы параметров, характеризующих транспортные средства;  $Z$  – распределение транспортных средств по узлам маршрутной сети (пунктам базирования);  $U$  – множество дополнительных ограничений маршрутной сети;  $C$  – множество показателей, характеризующих затраты различных типов ресурсов на транспортировку грузов (стоимость, время и др.);  $T_H$  – продолжительность периода планирования.

Выходной параметр  $X$  задает сценарий транспортировки грузов в виде распределения транспортных средств по маршрутам сети (для каждого транспортного средства при этом может быть задан план загрузки и размещения грузов на БПЛА), при этом решается оптимизационная задача вида, где в роли целевых показателей, как было отмечено выше, выступают затраты различных типов ресурсов

$$(12) C(X) \rightarrow \min.$$

Рассмотрим математическую модель для данного шага.

Введем следующие обозначения:

$N$  – число узлов транспортной сети;

$d_{ij}, i, j = 1, \dots, N$ , – расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м узлами транспортной сети;

$a_{ij}, i, j = 1, \dots, N$ , – объем груза, необходимого для транспортировки из  $i$ -го узла транспортной сети в  $j$ -й узел в течение всего периода планирования;

$S_i^{max}, i = 1, \dots, N$ , – максимальное количество БПЛА, которое может принять  $i$ -й узел транспортной сети в течение всего периода планирования;

$Q_i^{max}, i = 1, \dots, N$ , – максимальное количество БПЛА, которые могут базироваться в  $i$ -м узле транспортной сети в течение всего периода планирования;

$K$  – общее количество доступных БПЛА;

$V_k, k = 1, \dots, K$ , – набор технических и эксплуатационных параметров  $k$ -го БПЛА;

$b_k, k = 1, \dots, K$ , – вместимость  $k$ -го БПЛА;

$c_k, k = 1, \dots, K$ , – удельные затраты на эксплуатацию  $k$ -го БПЛА на единицу времени;

$L_k, k = 1, \dots, K$ , – максимально допустимое количество перелетов, которое может выполнить  $k$ -й БПЛА в течение периода планирования (данное ограничение может быть обусловлено техническими требованиями и/или опытом эксплуатации БПЛА соответствующего типа);

$l(k) = 1, \dots, L_k$  – показатель, задающий номер перелета, выполняемого  $k$ -м БПЛА;

$h_{ij}^k, k = 1, \dots, K; i, j = 1, \dots, N$ , – индикатор допустимости перелета, принимает значение 1, если  $k$ -й БПЛА может совершить перелет из  $i$ -го узла транспортной сети в  $j$ -й узел, и 0 – иначе (при этом  $h_{ii}^k = 0 \forall i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, K$ );

$T$  – продолжительность периода планирования;

$TP^k$  – время, требуемое для выполнения операций по обслуживанию  $k$ -го БПЛА перед вылетом и после завершения перелета;

$T_{ij}^k, k = 1, \dots, K; i, j = 1, \dots, N$ , – средняя продолжительность перелета  $k$ -го БПЛА из  $i$ -го узла транспортной сети в  $j$ -й узел (данная величина определяется на основе расстояний между узлами и скоростными характеристиками БПЛА конкретного типа).

Переменными задачи являются следующие бинарные величины:



$x_{i,j,l(k)}^k$ ,  $k=1, \dots, K$ ;  $i, j=1, \dots, N$ ;  $l(k)=1, \dots, L_k$ , – индикатор выполнения  $k$ -м БПЛА перелета с номером  $l(k)$  из  $i$ -го узла транспортной сети в  $j$ -й узел.

Далее введем ограничения рассматриваемой задачи.

Бинарные переменные, соответствующие перелету из узла транспортной сети в тот же самый узел, тождественно равны нулю:

$$(13) x_{i,i,l(k)}^k = 0, k=1, \dots, K; i=1, \dots, N; l(k)=1, \dots, L_k.$$

БПЛА не может выполнять более одного перелета одновременно:

$$(14) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k \leq 1, k=1, \dots, K; l(k)=1, \dots, L_k.$$

Последовательность выполняемых каждым БПЛА перелетов должна начинаться с перелета, имеющего номер 1, и не должна иметь разрывов:

$$(15) \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)+1}^k \leq \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k, k=1, \dots, K; \\ i=1, \dots, N; l(k)=1, \dots, L_k - 1.$$

После завершения очередного перелета БПЛА может совершить следующий по одному из разрешенных для него маршрутов либо остаться в пункте базирования:

$$(16) \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k \leq (1 - \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)+1}^k) + \sum_{j=1}^N (h_{i,j}^k \cdot x_{i,j,l(k)+1}^k), \\ k=1, \dots, K; i=1, \dots, N; l(k)=1, \dots, L_k - 1.$$

Путем преобразований можно получить более простую форму записи для данного ограничения:

$$(17) \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k \leq 1 - \sum_{j=1}^N (x_{i,j,l(k)+1}^k \cdot (1 - h_{i,j}^k)).$$

Ограничения на пропускную способность узлов транспортной сети:

$$(18) \sum_{k=1}^K \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^N x_{i,j,l(k)}^k \leq S_j^{max}, j=1, \dots, N.$$

Ограничения на количество БПЛА, приписанных к каждому пункту базирования:

$$(19) \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)=1}^k \leq Q_i^{max}, i=1, \dots, N.$$

Суммарное время пребывания БПЛА на маршруте ограничено продолжительностью периода планирования:

$$(20) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{i,j,l(k)=1}^k \cdot TP^k) + \\ \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (x_{i,j,l(k)}^k \cdot (T_{i,j}^k + TP^k)) \leq T, k=1, \dots, K.$$

В конце периода планирования каждый БПЛА должен оказаться в пункте базирования:

$$(21) \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{j=1}^N x_{i,j,l(k)}^k = \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{j=1}^N x_{j,i,l(k)}^k, \\ k = 1, \dots, K; i = 1, \dots, N.$$

Условие транспортировки всего имеющегося запаса груза:

$$(22) a_{ij} - \sum_{k=1}^K \sum_{l(k)=1}^{L_k} (x_{i,j,l(k)}^k \cdot b_k) \leq 0, i, j = 1, \dots, N.$$

Целевая функция соответствует суммарным затратам на эксплуатацию БПЛА и подлежит минимизации по бинарным переменным  $x_{i,l(k)}^k$  при заданных ограничениях:

$$(23) \sum_{k=1}^K \sum_{l(k)=1}^{L_k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (c_k \cdot x_{i,j,l(k)}^k \cdot T_{i,j}^k) \rightarrow \min.$$

После того как было получено множество различных сценариев, каждый из которых сформирован с использованием определенного набора входных параметров и оптимизирован на основе различных целевых показателей, возникает задача комплексной оценки сформированных сценариев по набору критериев и выбора на основе этого наиболее предпочтительного сценария, который далее будет реализован. Задаются система предпочтений  $P$  и набор критериев  $C$  и вычисляется множество  $X^*$ , содержащее один оптимальный сценарий, либо несколько ранжированных сценариев. Модель задачи имеет вид:

$$(24) \langle X_F, C, P; D, X^* \rangle,$$

где  $X_F$  – множество допустимых сценариев, сформированных в результате решения перечисленных выше задач;  $C$  – набор критериев оценки сценариев;  $P$  – система предпочтений, определяющая стратегию сравнения сценариев по набору критериев  $C$ ;  $D$  – множество решающих правил, построенных на основе системы предпочтений  $P$  и задающих методы и алгоритмы сравнения сценариев;  $X^*$  – результирующее множество сценариев с установленной на нем структурой предпочтений.

Множество  $X^*$  может содержать оптимальный сценарий, либо несколько сценариев, ранжированных по предпочтительности, либо распределение сценариев по некоторым классам.

Функциональные схема алгоритма разработанного метода управления группой БПЛА в задаче транспортировки грузов представлена на рис. 1.

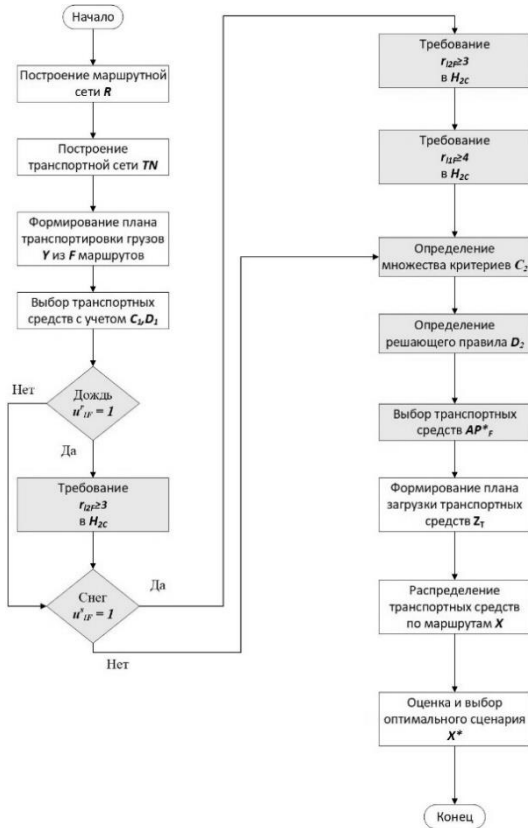


Рис. 1. Блок-схема алгоритма разработанного метода управления

Алгоритм позволяет получать новые эффективные решения, представленные оптимальным сценарием транспортировки грузов, обладающим более высокой оценкой эффективности управления.

#### 4. Эксперимент и его результаты

Для подтверждения эффективности разработанного метода управления проводится эксперимент в программной среде GAMA и Python.

Оценка оптимального сценария будет вычисляться по формуле

$$(25) E_X = \sum_{k=1}^n \sum_{l(k)=1}^N (flight\ hour_k * time_{l(k)} + cargo\ cost_{l(k)}),$$

где  $flight\ hour_k$  – стоимость летного часа для  $k$ -го БПЛА;  $time_{l(k)}$  – среднее время  $l(k)$  перелета;  $cargo\ cost_{l(k)}$  – стоимость груза, перевозимого при перелете  $l(k)$ .

Данная оценка оптимального сценария является частным случаем формулы (23), приведенной в предыдущем разделе.

Выбраны три района, расположенные недалеко от Москвы, Петропаловска-Камчатского и Архангельска. Считается, что доставка в такие районы может быть затруднительной, поскольку они находятся далеко от транспортных магистралей и обладают слабо развитым транспортно-логистическим сервисом. Созданы три карты этих районов для дальнейшего использования в программном комплексе. Пример карты местности с отраженными БПЛА разных типов, источников и стоков в эксперименте представлен на рис. 2.

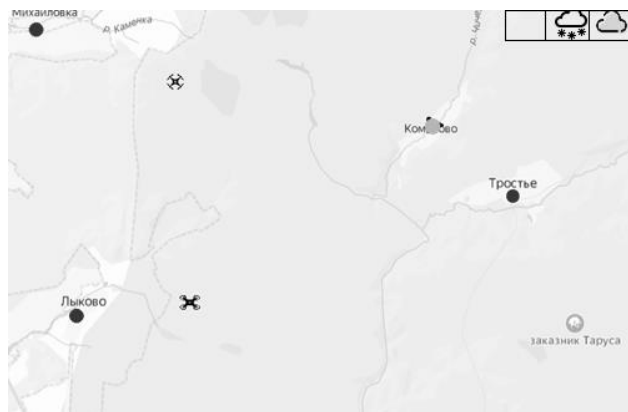


Рис. 2. Пример карты местности в эксперименте

На рис. 2 представлен район, расположенный вблизи Москвы, отмечены источники и стоки, а также БПЛА. Карта местности использовалась в программной среде GAMA для визуализации и симуляции полета группы БПЛА в эксперименте.

Выбор программной среды GAMA для проведения эксперимента определен следующими факторами:

1. GAMA является бесплатной, таким образом доступом к ней обладает любой пользователь.

2. GAMA успешно справляется с визуализацией и симуляцией поведения агентов, под которыми в текущем случае могут выступать БПЛА, грузы, стоки, источники, промежуточные пункты.

3. GAMA обладает большим набором готовых модулей, что означает возможность легкого обучения и адаптирования информации под желаемые задачи [24].

Таким образом, GAMA обеспечивает достаточные возможности для мониторинга и контроля над полетом группы БПЛА.

Использование GAMA позволило провести качественную визуализацию и симуляцию полета группы БПЛА для транспортировки грузов на основе данных, рассчитанных в Python, с использованием специальных средств отображения – карты местности, БПЛА, иконок, отражающих метеорологические условия. При написании программного обеспечения в GAMA учитывались следующие готовые модули: «Импорт SHP», «PNG иконки», «Эксперимент и симуляция», «Следование пути».

Сформированы координаты центров четырёх источников, одного стока и четырёх промежуточных пунктов. Считается, что местность не является горной и высота местности для всех точек карты местности равна. Высота полета задается относительно высоты местности и принимает значение 130 м. Предполагается, что все источники, стоки и промежуточные пункты могут обслуживать поддерживаемые типы транспортных средств, отправлять и принимать любые типы транспортных средств. В качестве используемых БПЛА рассматривались БПЛА трёх типов с заданным набором характеристик (см. таблицу 3).

Также задана стоимость летного часа 150 р. В качестве грузов были выбраны 4 единицы грузов, по одной каждого типа. Тип груза определялся его уникальным названием и массой. Предполагалось, что грузы упакованы в коробки и каждый БПЛА может перевозить лишь одну коробку. Сами грузы были выбраны на основе статистики о спросе на основные товары, в котором нуждается человек и осуществляет покупки [11]. К таким товарам относятся телефон, обувь, еда (пицца), медикаменты. Для каждого груза определена его масса вместе с упаковкой. Это 0,5, 1, 0,8,

1,2 кг соответственно. Потребность в стоке – по 1 единице каждого груза. Запасы в источниках – по 1 единице каждого груза.

Таблица 3. Характеристики БПЛА в эксперименте

Характеристика	БПЛА №1 (самодельный)	DJI Mavic Air 2	DJI Agras MG-1
Тип	1	2	3
Первая характеристическая цифра кода IP	4	4	5
Вторая характеристическая цифра кода IP	3	3	2
Максимальная крейсерская скорость, м/с	15	19	17
Скорость взлета, м/с	6	5	5
Скорость посадки, м/с	6	4	3
Максимальная грузоподъемность, кг	0,6	0,3	3

Характеристики, связанные с метеорологической обстановкой – индикатор дождя, индикатор снега и снежной крупы, – были сформированы на основе собранной статистики для Москвы, Петропавловска-Камчатского и Архангельска за 2023 год [11]. Некоторые значения собранных индикаторов дождя и снега представлены на рис. 3–5.

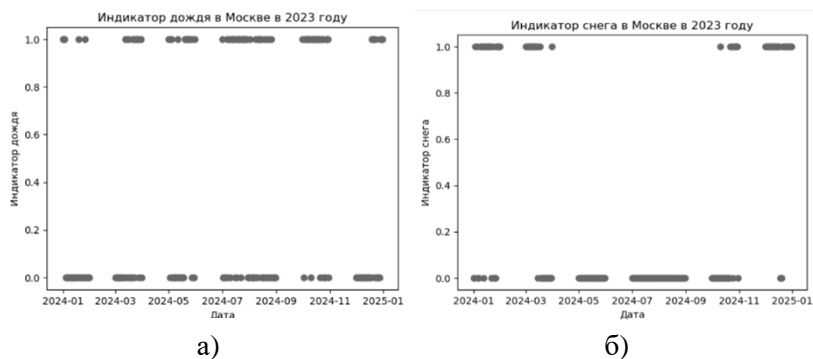


Рис. 3. Индикаторы дождя и снега в Москве за 2023 год в эксперименте

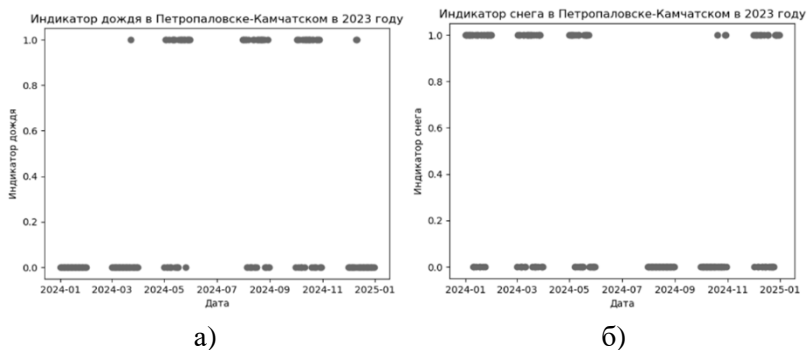


Рис. 4. Индикаторы дождя и снега в Петропавловске-Камчатском за 2023 год в эксперименте

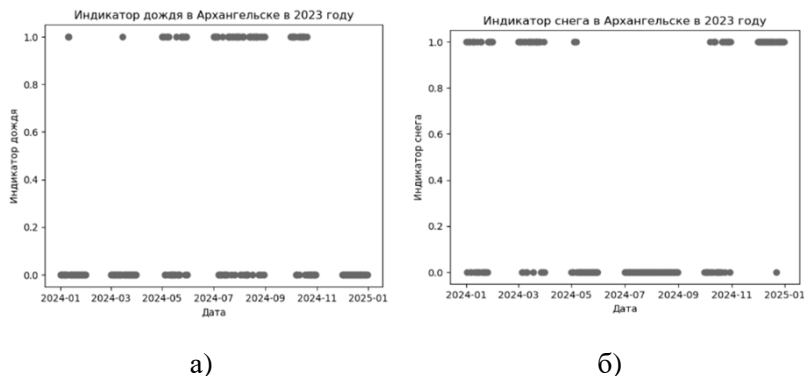


Рис. 5. Индикаторы дождя и снега в Архангельске за 2023 год в эксперименте

После сбора данных о наличии дождя, снега и снежной крупы за 2023 год для каждого из районов производилась обработка и группировка информации об явлениях, состоящая из следующих шагов:

- 1) вычисление вероятности снега и снежной крупы, дождя на исследуемом временном периоде;
- 2) генерация индикаторов дождя, снега и снежной крупы на основе вычисленной вероятности.

Допустим, имеются значения  $e_i$ , в колонке Явления, среди которых значения  $s_i$ , определяют наличие снега и снежной крупы, значения  $r_i$ , определяют наличие дождя, а значения  $n_3$  свидетельствуют об отсутствии явлений.

Расчет вероятности снега и снежной крупы на исследуемом временном периоде производился по формуле

$$(26) P_s = \frac{n_1}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n I(e_i = \text{«Снег»})}{n},$$

где  $I(e_i = \text{«Снег»})$  – индикатор, принимающий значение 1 при выполнении условия и 0 – при невыполнении условия.

Расчет вероятности дождя на исследуемом временном периоде производится по формуле

$$(27) P_r = \frac{n_2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n I(e_i = \text{«Дождь»})}{n},$$

где  $I(e_i = \text{«Дождь»})$  – индикатор, принимающий значение 1 при выполнении условия и 0 при невыполнении условия.

Для генерации  $m_1$  индикаторов снега и снежной крупы  $u_k^s, k = 1, \dots, m_1$ , в качестве метеорологических ограничений маршрутной сети воспользуемся формулой

$$(28) u_k^s = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } P_s, \\ 0 & \text{с вероятностью } 1 - P_s. \end{cases}$$

Для генерации  $m_2$  индикаторов снега и снежной крупы  $u_k^r, k = 1, \dots, m_2$ , в качестве метеорологических ограничений маршрутной сети воспользуемся формулой

$$(29) u_k^r = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } P_r, \\ 0 & \text{с вероятностью } 1 - P_r. \end{cases}$$

Время планирования (максимальное время симуляции) приравниваем к 24 ч. Такое время задано примерно, но предположительно в течение 24 ч все доставки могут быть осуществлены при заданных условиях. На этапе реконфигурации БАС используются муравьиный и генетический алгоритм. Другие ограничения для построения маршрутной сети отсутствуют. Решение задачи распределения транспортных средств по маршрутам происходит с помощью методов The Clarke & Wright [16], Sweep [19], генетического [21] и муравьиного [25] алгоритма. Пусть для каждой исследуемой зоны генерируется по 365 ограничений, связанных с погодными условиями. Таким образом, общее число сформиро-



ванных ограничений – 1095, а общее количество полученных решений – 4380. Выбор данного количества ограничений определялся годичным циклом, в течение которого можно использовать группы БПЛА для транспортировки грузов при различных метеорологических условиях, при этом 1095 ограничений для каждого района можно считать достаточно большим числом для формирования репрезентативной выборки. В качестве оценок эффективности используются две: среднее время транспортировки грузов и эффективность, отражающая «экономический эффект», определяемые формулами (23) и (25). Примеры результатов применения разработанных методов управления в транспортировке грузов и существующего метода для Москвы представлены в таблицах 4, 5, 6. «Старая модель» в таблице 4 означает, что для выбора транспортных средств с заданными характеристиками по формуле (10) наличие снега и дождя относится к неблагоприятным условиям проведения полета, т.е.  $A_F \in \emptyset$  при  $u_{iF}^r = 0$  или  $u_{iF}^s = 0$  в  $U_{2F}$ .

Таблица 4. Результаты эксперимента для Москвы

№	Индекс дождя, индекс снега	Оценка эфф. №1 (старая модель), с	Оценка эфф. №1 (новая модель), с	Оценка эфф. №2 (старая модель), руб	Оценка эфф. №2 (новая модель), руб
1	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,0	1015,00	1015,00	270,00	270,00
4	0,0	1024,34	1024,34	456,89	456,89
...	...	...	...	...	...
1459	1,0	0,00	1058,96	0,00	1149,18
1460	1,0	0,00	1063,13	0,00	1232,64
Среднее	–	595,00	740,91	430,71	522,76
Дисперсия	–	264600,80-	208088,70	202970,80	202970,80

Таблица 5. Результаты эксперимента для Петропавловска-Камчатского

№	Индекс дожда, индекс снега	Оценка эфф. №1 (старая модель), с	Оценка эфф. №1 (новая модель), с	Оценка эфф. №2 (старая модель), руб	Оценка эфф. №2 (новая модель), руб
1	0,0	1022,69	1022,69	423,72	423,72
2	0,0	1023,71	1023,71	444,21	444,21
3	0,0	1023,71	1023,71	444,21	444,21
4	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00
...	...	...	...	...	...
1459	0,0	1024,88	1024,88	467,68	467,68
1460	0,0	1015,00	1015,00	270,00	270,00
Среднее	–	666,62	809,10	271,83	322,61
Дисперсия	–	237306,20	172290,30	44726,47-	34654,49

Таблица 6. Результаты эксперимента для Архангельска

№	Индекс дожда, индекс снега	Оценка эфф. №1 (старая модель), с	Оценка эфф. №1 (новая модель), с	Оценка эфф. №2 (старая модель), руб	Оценка эфф. №2 (новая модель), руб
1	1,0	0,00	1017,22	0,00	314,37
2	0,0	1016,96	1016,96	309,15	309,15
3	0,0	1016,96	1016,96	309,15	309,15
4	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00
...	...	...	...	...	...
1459	1,0	0,00	0,00	0,00	0,00
1460	0,0	1018,70	1018,70	343,94	343,94
Среднее	–	624,57	754,11	199,00	238,07
Дисперсия	–	245718,20	198812,50	26322,64	21526,02

В результате были получены следующие выводы:

1. Москва. Применение нового метода позволяет повысить оценку эффективности №1 на 24,52% при уменьшении дисперсии на 16,63% по сравнению со стандартным методом, но уменьшает

оценку эффективности №2 на 21,37% при уменьшении дисперсии на 2,45%.

2. Петропавловск-Камчатский. Применение нового метода позволяет повысить оценку эффективности №1 на 21,37% при уменьшении дисперсии на 27,40% по сравнению со стандартным методом, но уменьшает оценку эффективности №2 на 18,68% при уменьшении дисперсии на 22,52%.

3. Архангельск. Применение нового метода позволяет повысить оценку эффективности №1 на 20,74% при уменьшении дисперсии на 19,09% по сравнению со стандартным методом, но уменьшает оценку эффективности №2 на 19,63% при уменьшении дисперсии на 18,22%.

Вычисленные общие средние значения оценок эффективностей представлены в таблице 7.

*Таблица 7. Результаты эксперимента*

Метод управления	Оценка №1	Оценка №2
Стандартный метод	628,73	300,51
Новый метод	768,04	361,14

Из таблицы 7 следует, что применение нового метода управления группой БПЛА позволяет повысить оценку эффективности №1 на 20,17% по сравнению со стандартным методом, но уменьшает оценку эффективности №2 на 22,15%.

Пусть для ЛПР более предпочтительна оценка эффективности №1, тогда можно сделать вывод, что разработанный метод управления гетерогенной группой БПЛА в транспортировке грузов позволяет повысить эффективность транспортировки грузов. Данный факт подтверждается результатами проведенного эксперимента, где оценка эффективности повысилась на 20,17% по сравнению с полученной в результате применения стандартного метода.

## **5. Заключение**

Данная работа посвящена разработке метода управления БАС с учетом кода IP в задаче транспортировки грузов. Анализ моделей, методов и алгоритмов управления группой БПЛА

в транспортировке грузов показывает, что они не учитывают характеристику – код IP, который является определяющим при формировании метеорологических ограничений для маршрутной сети и выборе транспортных средств с заданными характеристиками.

Значение первой характеристической цифры кода IP БПЛА отражает его степень защиты от проникновения твердых частиц. Значение второй характеристической цифры кода отражает степень защиты от попадания воды. Таким образом, можно учитывать данные характеристики при формировании метеорологических ограничений: дождя, снега и снежной крупы. Расширенная маршрутная сеть позволяет лучше анализировать и проводить мониторинг выполнения доставки грузов, принимать решения с учетом данных ограничений. При этом ЛПР может выбирать транспортные средства (БПЛА) с необходимыми ему характеристиками, в том числе учитывая значения первой и второй характеристической цифры кода IP. Формирование требований, учитывающих код IP, позволяет формировать новые полеты в условиях дождя, снега и снежной крупы, которые в большинстве случаев могут оказаться рискованными, т.е. вызывать неисправности при полете БПЛА и, соответственно, при доставке грузов. Метод управления группой БПЛА в задаче транспортировки грузов с реконfigurацией БАС в зависимости от заданных метеорологических условий позволяет сформировать критерии и решающие правила для формирования состава БАС, и обеспечить лучшую по сравнению с существующими методами оценку эффективности управления. Данный факт был подтвержден в вычислительном эксперименте, в результате которого показано, что разработанный метод позволяет повысить оценку эффективности транспортировки грузов на 20,17% по сравнению с оценкой, полученной в результате применения стандартного метода.

Разработанный метод управления БАС в задаче транспортировки грузов можно в дальнейшем попытаться улучшить за счет учета новых метеорологических ограничений, например, связанных с облачностью и температурой.

## Литература

1. АНТОХИН Е.А., ПАНАСЕНКО Н.Н., АТАКИЩЕВ О.И. и др. *Обеспечение безопасности испытаний беспилотных летательных аппаратов военного и специального назначения* // Известия института инженерной физики. – 2019. – №2(52). – С. 71–76.
2. АСТАПЕНКО П.Д., БАРАНОВ А.М., ШВАРЕВ И.М. *Погода и полеты самолетов и вертолетов*. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 276 с.
3. *ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529:2013). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP)*. – М.: Стандартинформ, 2019. – 36 с.
4. ЗАХАРОВА А.А., КУТАХОВ В.П., МЕЩЕРЯКОВ Р.В. и др. *Моделирование задач транспортировки грузов в беспилотной авиационной системе* // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – №3. – С. 3–15.
5. КУЗНЕЦОВ И.Е., МЕЛЬНИКОВ А.В., РОГОЗИН Е.А. и др. *Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа* // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2018. – Т. 45, №2. – С. 125–139.
6. ЛАЗУТКИН А.В., УРВАНЦЕВ Р.А., ФЛОРОВ А.В. и др. *Анализ статистических данных о полетах беспилотных летательных аппаратов серии SUPERCAM в сложных метеорологических условиях для картографии и видеоразведки* // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. Сборник статей и докладов по материалам ежегодной научно-практической конференции. – 2016. – С. 268–272.
7. МОИСЕЕВ Д.В., ЧИНЬ В.М. *Вычислительные аспекты и прикладное программное обеспечение оптимальной маршрутизации полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра* // Вестник евразийской науки. – 2017. – Т. 9, №3(40). – С. 92.

8. МОИСЕЕВ Д.В., ЧИНЬ В.М., МОЗОЛЕВ Л.А. и др. *Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра на основе решения разновидностей задачи коммивояжера* // Труды МАИ. – 2015. – №79. – С. 8.
9. НОСОВ А.М., САВЕЛЬЕВ А.И., ВИЛЬЯНИНОВ В.Н. и др. *Опыт транспортировки компонентов крови с применением беспилотного летательного аппарата* // Медицина катастроф. – 2022. – №3. – С. 65–69.
10. *Официальный сайт компании Zipline.* – URL: <https://www.flyzipline.com/technology> (дата обращения: 27.06.2023)
11. *Официальный сайт федеральной службы государственной статистики.* – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 29.12.2023)
12. *Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р: официальный сайт. Программа «Цифровая экономика»* – URL: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения: 20.10.2023).
13. РОМАНЕНКО В.А. *Математические модели функционирования аэропортов в условиях современного авиатранспортного рынка: монография.* – Самара: ООО «Издательство Ас Гард», 2010. – 244 с.
14. *Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Совет Безопасности Российской Федерации: официальный сайт.* – URL: <http://www.scrf.gov.ru/security/economic/document123/> (дата обращения: 20.10.2023).
15. BOYCHEV I.Z. *Research algorithms to optimize the drone route used for security* // IEEE XXVII Int. Scientific Conf. Electronics (ET-2018). – 2018. – P. 1–4.
16. CLARKE G., WRIGHT J.W. *Scheduling of vehicles from a Central Depot to a Number of the Delivery Point* // Operations Research. – 1964. – P. 568–581.
17. DERPICH I., MIRANDA D., SEPULVEDA J. *Using drones in a warehouse with minimum energy consumption* // 7th Int. Conf. on Computers Communications and Control (ICCC-2018). – 2018. – P. 97–102.

18. GJORSHEVSKI H., TRIVODALIEV K., KOSOVIC I.N. et al. *Dynamic Programming Approach for Drone Routes Planning* // 26th Telecommunications Forum (TELFOR-2018). – 2018. – P. 1–4.
19. HANAFI R., RUSMAN M., MARDIN F. et al. *Distribution Route Optimization of a Capacitated Vehicle Routing Problem by Sweep Algorithm* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – P. 1–6.
20. LIONG C.Y., WAN I., OMAR K. *Vehicle routing problem: Models and solutions* // Journal of Quality Measurement and Analysis. – 2008. – Vol. 4. – P. 205–218.
21. MITCHELL M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. – The MIT Press, 1998. – P. 2.
22. NEOGI A., MOUNIKA S., KALYANI S. et al. *A Comprehensive Study of Vehicle Routing Problem With Time Windows Using Ant Colony Optimization Techniques* // Int. Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – P. 80–85.
23. RAIVI A., HUDA S., ASIFUL M. et al. *Drone routing for drone-based delivery systems: a review of trajectory planning, charging, and security* // Sensors. – 2023. – P. 23.
24. TAILLANDIER P., GAUDOU B., GRIGNARD A. et al. *Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform* // Geoinformatica. – 2019. – Vol. 23(2). – P. 299–322.
25. WALDNER J. *Nanocomputers and Swarm Intelligence*. – John Wiley & Sons, Inc., 2008. – P. 225.

## **DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CONTROLLING UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE IP CODE IN THE TASK OF CARGO TRANSPORTATION**

**Alexander Salomatin**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Junior Researcher (karateka30@mail.ru).

*Abstract: The paper is devoted to the development of a method for controlling unmanned aerial systems taking into account the IP code in the task of cargo transportation. A short review of works devoted to methods and algorithms of group control*

*of unmanned aerial vehicles (UAVs) in cargo transportation is carried out. New mathematical models and method of control of heterogeneous group of UAVs in the task of cargo transportation are proposed. The basis for their development is the consideration of the IP code for the formation of meteorological constraints of the route network. The first and second characteristic digits of the IP code allowed us to determine the limitations of the influence of rain, snow and snowdrifts. These phenomena can have serious consequences for UAVs in flight, leading them to various kinds of malfunctions. The decision maker (DM) can select the UAV for the mission with the required IP code digits, thus reconfiguring the unmanned aerial system (UAS) and forming more effective solutions from the management point of view. A computational experiment is conducted to confirm this statement. For the considered areas, the application of the new method, taking into account the IP code for the UAV, allows to improve the efficiency estimation in comparison with the existing method.*

**Keywords:** unmanned air transport system, unmanned aerial vehicle, cargo transportation, unmanned air transport system control, IP code.

УДК 629.7

ББК 39.58

DOI: 10.25728/ubs.2024.110.6

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии А.К. Погодаевым.*

*Поступила в редакцию 07.05.2024.*

*Опубликована 31.07.2024.*