

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-467-477

RESEARCH OF MODELS AND METHODS FOR PRACTICAL IMPLEMENTATION OF UNMANNED TRANSPORT SYSTEMS FOR MARINE PASSENGER TERMINALS

A. S. Kostin, N. N. Maiorov, D. V. Kuchko

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

Two scenarios for the use of unmanned systems for marine passenger terminals that are identification of passengers at the terminal and tracking of moving objects are considered. The experimental study and the developed automation routines for identifying passengers were carried out on the basis of the laboratory of unmanned aircraft systems of Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. For passenger terminal models, flight tasks of unmanned systems are simulated in the specialized Gazebo environment. Based on a series of experiments, it is found that the chosen method of histogram of oriented gradients provides a high level of accuracy and reliability. It is noted that the Matthews correlation coefficient, which reaches 95.09%, indicates a high degree of consistency and quality of binary classification of machine learning methods. During testing, the oriented gradient histogram method has showed that those with lower results in accuracy have received high results in sensitivity (reminder), which is 97.53%. This indicates that the use of this method can effectively minimize the number of false negative results, which is especially important in tasks where missing and losing an object during its identification can have serious consequences. As a result of the research carried out, the effectiveness of using the presented method is proven. The effectiveness of the developed new subprograms for passengers and other specified objects automatic identification, as well as the identification and tracking of objects for the first time when they are considered in the systems of marine passenger terminals, is also proven. It facilitates management and contributes to increased safety levels and monitoring effectiveness.

Keywords: unmanned transportation system, object identification, machine vision, histogram of directional gradients, marine passenger terminals, identification automation, intelligent transportation systems, passenger flow.

For citation:

Kostin, Anton S., Nikolai N. Maiorov, and Dmitry V. Kuchko. "Research of models and methods for practical implementation of unmanned transport systems for marine passenger terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 467–477. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-467-477.

УДК 656.072

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОРСКИХ ПАССАЖИРСКИХ ТЕРМИНАЛОВ

А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Д. В. Кучко

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрено два сценария использования беспилотных транспортных систем для морских пассажирских терминалов: идентификация пассажиров в терминале и отслеживание движущихся объектов. Экспериментальное исследование сценариев и разработанных подпрограмм автоматизации по идентификации пассажиров выполнено на базе лаборатории беспилотных авиационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Для модели пассажирского терминала в специализированной среде Gazebo выполнено моделирование полетных заданий беспилотных систем. На основе серии экспериментов установлено, что выбранный метод Histogram of Oriented Gradients демонстрирует высокий уровень точности и надежности. Отмечается, что коэффициент корреляции Мэтьюса, достигший 95,09 %, свидетельствует о высокой степени согласованности и качества бинарной классификации методов

машинного обучения. При проведении испытаний метод *Histogram of Oriented Gradients* показал, что наряду с более низкими результатами точности получены высокие результаты чувствительности (*Recall*), составляющие 97,53 %. Это свидетельствует о том, что применение данного метода позволяет эффективно минимизировать количество ложноотрицательных результатов, что является особенно важным в задачах, где пропуск и потеря объекта при его идентификации могут иметь серьезные последствия. Разработанное автоматизированное решение должно иметь возможность применения для динамического мониторинга за перемещением пассажиров в терминале в режиме реального времени, а также позволять выполнять обработку потока данных с беспилотных систем в центре управления терминалом. Рассмотренная модель НОГ для обработки изображений от беспилотных систем предназначена для распознавания объектов пассажиров в терминалах с использованием библиотеки *OpenCV*. В результате выполненного исследования наряду с эффективностью использования рассматриваемого метода доказана эффективность разработанных новых подпрограмм автоматической идентификации пассажиров и других заданных объектов, а также идентификации и отслеживания объектов в реальном времени при их интеграции в информационные системы морских пассажирских терминалов, способствующей повышению уровня безопасности и эффективности мониторинга.

Ключевые слова: беспилотная транспортная система, идентификация объектов, машинное зрение, гистограмма направленных градиентов, морские пассажирские терминалы, автоматизация идентификации, интеллектуальные транспортные системы, пассажиропоток.

Для цитирования:

Костин А. С. Исследование моделей и методов практической реализации беспилотных транспортных систем для морских пассажирских терминалов / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Д. В. Кучко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 467–477. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-467-477.

Введение (Introduction)

Современные задачи использования беспилотных транспортных систем являются одним из важнейших аспектов современной технологической эволюции. Внедрение беспилотных транспортных систем позволяет получать динамические данные о состоянии транспортной системы, данные по изменениям, требующие для последующего анализа разработку моделей методов и алгоритмов анализа данных, идентификации объектов в потоке. Мониторинг и анализ данной области имеют важное значение, поскольку позволяют решать различные задачи, обеспечивая эффективное использование дронов для транспортных систем, в том числе морских. Среди ключевых задач данного исследования можно выделить следующие:

1. Мониторинг и анализ эффективности и безопасности использования беспилотных систем в гражданских целях для получения динамических данных.
2. Исследование структуры и интенсивности применения беспилотных систем в различных сферах, включая геодезию, сельское хозяйство, экологический мониторинг и др.
3. Определение временных пиков и спадов в применении беспилотных систем для эффективного управления ресурсами и инфраструктурой транспортных терминалов.

Тема исследования и моделирования с использованием дронов является особенно актуальной с учетом быстрого развития технологий и повышения интереса к автономным беспилотным системам [1], что во многом обусловлено потребностью в совершенствовании гражданских сфер, внедрением интеллектуальных транспортных систем, а также стремлением к улучшению качества и безопасности различных функций транспортных терминалов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На рис. 1 представлен результат выполненного наукометрического исследования, который отражает распределение публикаций и выполняемых научных исследований по сферам применения беспилотных транспортных систем, в том числе применительно к процессам для морских терминалов.

В ходе исследования публикационной активности по теме «Беспилотные авиационные системы», представленной в 2023 г. базой данных SCOPUS, были выявлены основные наукометрические показатели, а также проведены аналитические исследования по количеству публикаций

и авторов, выделены основные ключевые слова, по которым впоследствии можно осуществлять поиск научных работ. На основе выполненного анализа можно сделать вывод о том, что задачи машинной обработки данных, идентификации объектов, в том числе людей, а также реализация моделей отслеживания объектов занимают значительный объем мировых исследований.

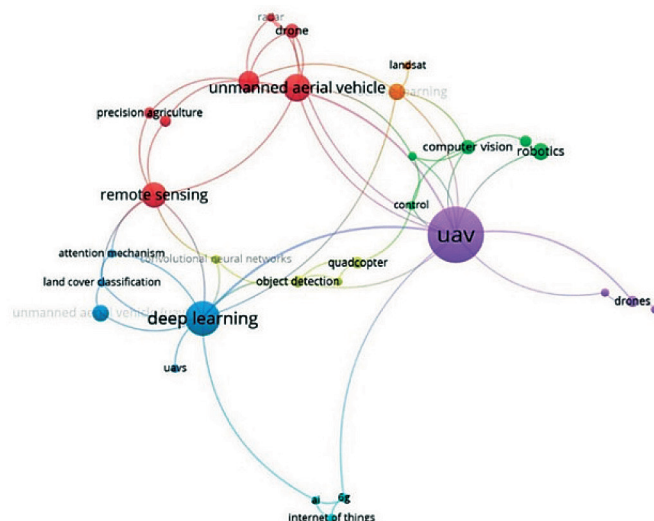


Рис. 1. Связь ключевого слова *unmanned aerial vehicles* с машинным обучением, идентификацией объектов, распознаванием изображений и обработкой данных
Fig. 1. The connection of the keyword “unmanned aerial vehicles” with machine learning, object identification, image recognition and data processing

Востребованность решения задачи автоматической идентификации пассажиров для морских пассажирских терминалов определяется необходимостью повышения безопасности, а также повышения качества анализа, прогнозирования и управления пассажирскими потоками. В публикациях [3], [4] рассмотрена разработанная цифровая модель морского пассажирского порта и представлено практическое решение задачи прогнозирования пассажиропотоков внутри терминала и оценки загруженности служб аэропорта. Разработанный инструментальный позволяет выполнить многосценарное моделирование перемещения пассажиров и решить задачу прогнозирования, а также сформировать данные для принятия решений при неопределенности [5]. Вместе с тем для повышения точности моделирования в цифровой двойник морского пассажирского порта необходимо внедрить модули обработки данных, полученных с беспилотных систем, с возможностью выполнения отслеживания перемещения пассажиров и построения их траектории.

Сценарий идентификации людей представляет собой задачу беспилотных авиационных систем, заключающуюся в подсчете количества посетителей определенного мероприятия. Этот сценарий реализован при помощи использования дополнительного навесного оборудования (камеры и платы управления с передачей видеопотока на сервер) [6], [7]. Данные для анализа берутся с беспилотных авиационных систем — квадрокоптеров. При выполнении модельных сценариев рассматриваются задачи как очного, так и автономного пилотирования в терминале. При помощи беспилотных авиационных систем производится облет по выбранному маршруту [8], [9] зоны проведения мероприятия, и с помощью дополнительных камер видеопоток отправляется на компьютер-сервер, где в дальнейшем происходит его обработка при помощи программного кода. Идентификация искомым объектов осуществляется на базе гистограммы направленных градиентов.

Гистограмма направленных градиентов (Histogram of Oriented Gradients (далее — HOG)) — это дескрипторы особых точек, используемых в компьютерном зрении и обработке изображений с целью распознавания объектов. В основе данного признака подсчет количества направлений градиента в локальных областях изображения [9].

Основой метода HOG является допущение, что внешний вид и форма объекта на изображении могут быть описаны распределением градиентов. Значения градиентов рассчитываются в горизонтальном и / или вертикальном направлении с помощью одномерной дифференцирующей маски. Данный метод требует фильтрации цветовой или яркостной составляющей при помощи следующих фильтрующих ядер: $[-1, 0, 1]$ и $[1, 0, -1]$ *T*. Для того чтобы вычислить HOG-дескриптор, ориентация и величина каждого пикселя в изображении рассчитываются по следующим формулам:

$$g_x = f(x+1, y) - f(x-1, y);$$

$$g_y = f(x, y+1) - f(x, y-1);$$

$$m(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2};$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{g_y}{g_x} \right),$$

где $f(x, y)$ — значение яркости пикселя с координатами (x, y) ;

$\theta(x, y)$ — ориентация;

$m(x, y)$ — величина градиента пикселя (x, y) .

Каждый элементарный вычислитель перестраиваемой вычислительной среды отвечает за обработку соответствующего одного пикселя исходного изображения и передачу необходимой информации. При этом элементарный вычислитель способен выполнять выделенный ряд операций над пикселем изображения путем программной перестройки. В ходе выполнения алгоритма *HOG* используется в качестве детектора объектов, который может быть обучен с помощью множества изображений для распознавания определенных объектов.

В разработанном модуле программа *HOG* используется для детектирования пассажиров. Модуль обрабатывает каждый кадр видеопотока, ищет области изображения, соответствующие ожидаемым параметрам людей, и в случае, если такие области установлены, их координаты добавляются в список «траектории» для каждого обнаруженного человека. Далее для каждого из них создается список его координат на каждом кадре, что отображается в виде траектории движения. Если человек исчезает из видеопотока на определенное время, то его идентификатор удаляется из списка обнаруженных людей после дополнительной проверки. В ходе отображения видеопотока программа отображает каждого найденного человека, а также рисует его траекторию движения и выполняет подсчет увиденных людей. Результаты работы программы приведены на рис. 2.



Рис. 2. Результаты работы подпрограммы по автоматической идентификации пассажиров в терминале
Fig. 2. Results of the subroutine for automatic identification of passengers in the terminal

Представленные на рис. 2 результаты показали, что программа работает корректно и обнаружение слежения за людьми происходит в режиме реального времени. Во время проведения эксперимента камера, расположенная на высоте 7 м под углом в 40 град., создает хороший обзор. Данные параметры размещения камеры служат для обеспечения в первую очередь безопасности для людей и окружающих объектов, а также для наилучшего угла обзора, что способствует более точному и более массовому определению людей, присутствующих на мероприятии.

Результаты исследования (Results of the Research)

Рассмотрим один из сценариев применения беспилотной системы и метода идентификации объектов. Сценарий отслеживания объекта (сценарий 2) так же, как и сценарий идентификации людей, использует идентичную полезную нагрузку и программный код. Изображение, полученное помощью беспилотных систем, отправляется в серверную часть, где обрабатывается. Затем сервер передает команду беспилотной системе следовать за объектом, удерживая его в центре изображения.

Лабораторные испытания предлагаемого метода и разработанных подпрограмм автоматизации с учетом применения беспилотной системы проводились в летном исследовательском поле лаборатории беспилотных авиационных систем ФГАОУ ВО ГУАП. Обработка данных с использованием лаборатории интеллектуальной транспортной инфраструктуры выполнялась там же. Маршрутизация квадрокоптера осуществлялась с помощью карты ArUco-меток ввиду невозможности использования GPS-сигнала в помещении (рис. 3) [10]–[12].

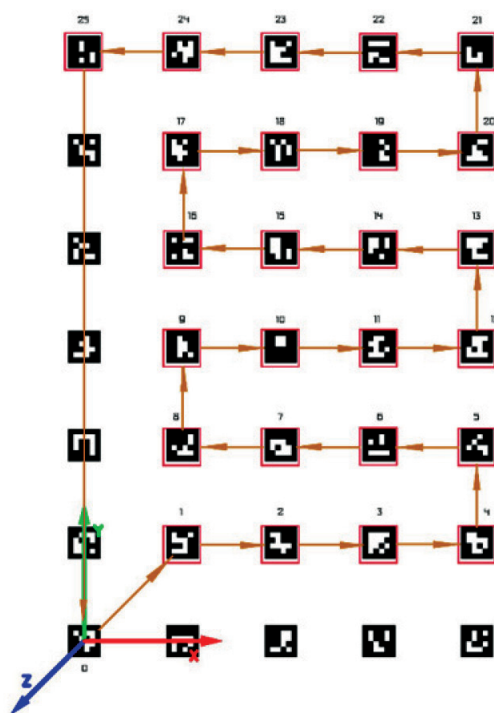


Рис. 3. Схема автономного полета беспилотной системы для моделирования идентификации пассажира
Fig. 3. The diagram of autonomous flight of the unmanned system for simulating passenger identification

В ходе лабораторного испытания беспилотной системой был произведен взлет и начало движения по координатам ArUco-маркеров [13], [14]:
navigate(z=1.5, frame_id='body', auto_arm=True)
rospy.sleep(5)

Следующим этапом является облет территории по координатам:

```
path = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24, 25]
```

```
path = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24, 25]
```

```
for n in path:
```

```
    last_saved_time = True
```

```
    print()
```

```
    print('flight to', n, coords[n])
```

```
    navigate_wait(x=coords[n][0], y=coords[n][1], frame_id='aruco_map', yaw=math.radians(90))
```

```
    image_sub = rospy.Subscriber('main_camera/image_raw', Image, photo_save, queue_size=1)
```

```
    print('made a pic')
```

После этого по завершении полета беспилотник возвратился на исходную точку и совершил посадку:

```
def navigate_wait(x=0, y=0, z=2, yaw=float('nan'), speed=0.5, frame_id='aruco_map', au-to_
arm=False, tolerance=0.2):
```

```
    navigate(x=x, y=y, z=z, yaw=yaw, speed=speed, frame_id=frame_id, auto_arm=auto_arm)
```

```
    while not rospy.is_shutdown():
```

```
        telem = get_telemetry(frame_id='navigate_target')
```

```
        if math.sqrt(telem.x ** 2 + telem.y ** 2 + telem.z ** 2) < tolerance:
```

```
            break
```

```
        rospy.sleep(0.2)
```

Для решения задачи идентификации объектов был разработан программный код, который в режиме реального времени выводит количество обнаруженных людей и строит их маршрут перемещения. На рис. 4 представлен результат идентификации людей в исследовательском летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем с борта беспилотной системы.

а)



б)



Рис. 4. Результат работы программы по выполнению
модельного сценария обнаружения пассажира:

- а — идентификации пассажира с борта автономной беспилотной системы;
- б — процесс выполнения автономного полета беспилотной системы

Fig. 4. The result of the program for executing
a model passenger detection scenario:

- a — passenger identification from the autonomous unmanned system;
- b — process of performing autonomous flight of the unmanned system

Фрагмент программного кода для идентификации пассажира:

```
hog = cv2.HOGDescriptor()
hog.setSVMDetector(cv2.HOGDescriptor_getDefaultPeopleDetector())
cap = cv2.VideoCapture(VIDEO_SOURCE)
cv2.namedWindow(WINDOW_NAME)
# Initialize variables
person_counter = 0
detected_people = []
prev_gray = None
previous_signal = False
free_ids = []
person_numbers = []
def centr(coord, side):
    return (coord + side // 2)
```

В данном решении реализована программа для обнаружения и отслеживания людей, использующая объектно-ориентированный подход и базирующаяся на основе библиотеки OpenCV. Начало идентификации объектов и людей начинается с инициализации видеопотока и настройки окна для отображения результатов. Затем инициализируются переменные, такие как список обнаруженных людей, их идентификаторы и другие параметры. Основная часть программы состоит из цикла, выполняемого до тех пор, пока работает видеокamera. В этом цикле происходит чтение кадра из видеопотока. Если кадр успешно прочитан, то он обрабатывается для обнаружения людей с использованием в этих целях детектора на основе HOG (Histogram of Oriented Gradients). При этом программа работает корректно, поиск объекта происходит в режиме реального времени, объект определяется относительно центра камеры в пределах погрешности, как и расстояние до него. Расстояние определяется путем преобразования известных размеров объекта и фокусного расстояния камеры. Данный способ является достаточно удобным, так как не требует дополнительного оборудования и является достаточно точным для выполнения данной задачи. При необходимости увеличения точности можно установить на беспилотную систему дополнительное оборудование, такое как дальномер и тепловизионные датчики, что позволит повысить точность обнаружения и идентификации людей и объектов. Предложенные улучшения требуют больших материальных и человеческих затрат, что можно реализовать в процессе в дальнейших исследований.

Обсуждение (Discussion)

Среди методов идентификации объектов авторами выбрана реализация на базе Histogram of Oriented Gradients для обработки изображений, полученных с беспилотной системы. Установлено, что метод HOG демонстрирует высокий уровень точности и надежности. Примечательно, что показатель MCC (коэффициент корреляции Мэтьюса), достигший 95,09 %, свидетельствует о высокой степени согласованности и качества бинарной классификации. При этом в реальных условиях метод показал несколько более низкие результаты по точности, но высокие результаты чувствительности (Recall) в 97,53 %. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что метод HOG эффективно минимизирует количество ложноотрицательных результатов, а это критически важно в задачах, где пропуск объекта может иметь серьезные последствия. Приведенные результаты подтверждают возможность практического использования метода на основе HOG для обработки изображений с беспилотных систем.

В целом данные испытаний показывают, что метод на основе HOG является эффективным инструментом для обработки изображений, получаемых в различных условиях, обеспечивая высокую точность и надежность результатов.

Интеграция разработанных подпрограмм автоматизации идентификации с цифровыми моделями морского пассажирского порта позволит на качественно новом уровне решать задачу прогнозирования, управления и мониторинга за пассажиропотоком в терминале. Использование разработанных подпрограмм автоматизации по отслеживанию перемещения пассажира позволяет также собрать данные по оценке эффективности организации внутритерминального пространства, служб и подразделений.

Результаты (Results)

Идентификация объектов с помощью беспилотных систем позволяет на качественно новом уровне исследовать транспортные процессы, повышать точность систем принятия решения по управлению терминалом. Использование беспилотных авиационных систем для реализации летных заданий по идентификации объектов и пассажиров является одним из эффективных подходов к решению различных задач, связанных с безопасностью, мониторингом и контролем. Для выполнения исследования был выбран метод HOG и произведено моделирование двух сценариев (идентификация людей и отслеживание движущихся объектов). Исследование проводилось в закрытом летном поле, однако разработанные подпрограммы применимы для обработки потоков данных для реальных пассажирских терминалов, в том числе и для морских.

Оценка результатов работы беспилотных систем для моделирования идентификации пассажиров в терминале и обработки данных показала их высокую эффективность и точность выполнения поставленных задач. Подпрограммы автоматизации обеспечивают обнаружение, идентификацию и отслеживание объектов в реальном времени, что способствует повышению уровня безопасности и эффективности мониторинга.

Таким образом, использование БАС в летном поле является перспективным направлением для решения различных задач и обеспечения безопасности и контроля на мероприятиях. Дальнейшее развитие и совершенствование подобных систем позволит расширить их функциональные возможности и применение в различных областях.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования моделей и методов маршрутизации беспилотных транспортных систем можно сделать следующие выводы:

1. В ходе исследования был проведен анализ сценариев применения беспилотных систем в различных областях, представлены результаты наукометрического анализа, подтверждающие необходимость решения задачи идентификации объектов, пассажиров и отслеживание движущихся объектов в транспортных пассажирских терминалах, в том числе морских.
2. В ходе исследования было выявлено, что беспилотные системы представляют собой эффективный инструмент для решения различных задач в области безопасности, мониторинга и контроля. Автоматизированные программные решения, основанные на компьютерном зрении и использовании навесного оборудования, продемонстрировали способность обнаруживать, идентифицировать и отслеживать объекты в реальном времени.
3. Модельные сценарии идентификации пассажиров в специализированном летном исследовательском поле моделирование в программной среде Gazebo показали эффективность разработанных подпрограмм и работу алгоритма на базе HOG.
4. Для имитации внутреннего пространства терминала был сформирован тестовый полигон с размещением опорных точек — Агисо-маркеров, между которыми беспилотная транспортная система перемещается и идентифицирует пассажиров. Для решения данной задачи был реализован программный код автономного перемещения с включением разработанных подпрограмм идентификации. Исходя из полученных результатов полетных заданий обеспечена точность идентификации объектов и реализация слежения за траекторией изменения выбранного объекта. Тестирование на группе людей также показало эффективность.

5. На основе реальных летных испытаний были получены результаты чувствительности (Recall) на уровне 97,53 %, что свидетельствует о том, что метод НОГ эффективно минимизирует количество ложноотрицательных результатов, что является критически важным в задачах, где пропуск объекта может иметь серьезные последствия.

6. Дальнейшее развитие и совершенствование таких систем позволит расширить их функциональные возможности и применение в различных сценариях использования для транспортных терминалов, в том числе морских пассажирских терминалов, что делает представленные разработки перспективными для дальнейших исследований и интеграции в существующие информационные системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kostin A. S.* Models and methods for implementing the autoumous performance of transportation tasks using a drone / A. S. Kostin // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE, 2021. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.

2. *Robakowska M.* Possibilities of using UAVs in pre-hospital security for medical emergencies / M. Robakowska, D. Ślęzak, P., Żuratyński, A. Tyrańska-Fobke, P. Robakowski, P. Prędkiewicz, K. Zorena // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2022. — Vol. 19. — Is. 17. — Pp. 10754. DOI: 10.3390/ijerph191710754.

3. *Krile S.* Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — Is. 7. — Pp. 3869. DOI: 10.3390/su13073869.

4. *Krile S.* The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals / S. Krile, N. Maiorov // Transport Problems. — 2020. — Vol. 15. — Pp. 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020-060.

5. *Бродецкий Г. Л.* Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности / Г. Л. Бродецкий. — М.: Academia, 2010. — 336 с.

6. *Костин А. С.* Эксплуатация беспилотных авиационных систем / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Т. Ю. Карпова. — СПб.: ГУАП, 2021. — 169 с.

7. *Engel J.* Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing / J. Engel, J. Sturm, D. Cremers // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/ RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal. — 2012. — Pp. 43–48.

8. *Kim J.* Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor VTOL aircraft / J. Kim, M. S. Kang, S. Park // Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA June 8–10, 2009. — Springer Netherlands, 2010. — Pp. 9–26. DOI: 10.1007/978-90-481-8764-5_2.

9. *Outay F.* Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges / F. Outay, H. A. Mengash, M. Adnan // Transportation research part A: policy and practice. — 2020. — Vol. 141. — Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.

10. *Костин А. С.* Разработка автоматизированных решений для исследования вариантов маршрутов доставки при совместном использовании транспортного средства и беспилотной авиационной системы в границах города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 7. — С. 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.

11. *Костин А. С.* Программа автономного полета беспилотной авиационной системы для реализации многоадресной доставки грузов / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Е. А. Вознесенский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615305 от 31.03.2022.

12. *Drexlm M.* Synchronization in vehicle routing — a survey of VRPs with multiple synchronization constraints / M. Drexlm // Transportation Science. — 2012. — Vol. 46. — Is. 3. — Pp. 297–316. DOI: 10.1287/trsc.1110.0400.

13. *Костин А. С.* Определение полетных заданий беспилотных авиационных систем применительно к операционным логистическим задачам / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Логистика: современные тенденции развития. Материалы XX международной научно-практической конференции. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2021. — Т. 1. — С. 150–157.

14. Костин А. С. Информационно-измерительные системы для контроля выполнения траектории авиационной системы / А. С. Костин // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXIV Международной научной конференции. — СПб.: ГУАП, 2021. — Т. Часть 1. — С. 219–226.

REFERENCES

1. Kostin, A.S. “Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone.” *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.
2. Robakowska, Marlena, Daniel Ślęzak, Przemysław Żuratyński, Anna Tyrańska-Fobke, Piotr Robakowski, Paweł Prędkiewicz, and Katarzyna Zorena. “Possibilities of using UAVs in pre-hospital security for medical emergencies.” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19.17 (2022): 10754. DOI: 10.3390/ijerph191710754.
3. Krile, Srećko, Nikolai Maiorov, and Vladimir Fetisov. “Modernization of the infrastructure of marine passenger port based on synthesis of the structure and forecasting development.” *Sustainability* 13.7 (2021): 3869. DOI: 10.3390/su13073869.
4. Krile, Srećko, and Nikolai Maiorov. “The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals.” *Transport Problems* 15 (2020): 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020-060.
5. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybor v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010.
6. Kostin, A.S., N. N. Maiorov, and T. Yu. Karpova. *Ekspluatatsiya bespilotnykh aviatsionnykh sistem*. SPb.: GUAP, 2021.
7. Engel, Jakob, Jurgен Sturm, and Daniel Cremers. “Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing.” *Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/ RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS)*. 2012. 43–48.
8. Kim, Jinhyun, Min-Sung Kang, and Sangdeok Park. “Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor VTOL aircraft.” *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA June 8–10, 2009*. Springer Netherlands, 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-8764-5_2.
9. Outay, Fatma, Hanan Abdullah Mengash, and Muhammad Adnan. “Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges.” *Transportation research part A: policy and practice* 141 (2020): 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.
10. Kostin, Anton Sergeevich, and Nikolai Nikolaevich Maiorov. “Development of automated solutions for the research of delivery route options in the joint use of a vehicle and an unmanned aerial system within the boundaries of the city.” *Izvestiya Tula State University* 7 (2022): 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.
11. Kostin, A.S., N. N. Maiorov, and E. A. Voznesenskii. Computer program certificate № 2022615305. Programma avtonomnogo poleta bespilotnoi aviatsionnoi sistemy dlya realizatsii mnogoadresnoi dostavki грузов. Russian Federation, assignee. Publ. 31 March 2022.
12. Drexler, Michael. “Synchronization in vehicle routing — a survey of VRPs with multiple synchronization constraints.” *Transportation Science* 46.3 (2012): 297–316. DOI: 10.1287/trsc.1110.0400.
13. Kostin, A.S., and N. N. Maiorov. “Determination of flight tasks of unmanned aircraft systems as applied to operational logistic tasks.” *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya. Materialy XX mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vol.1. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2021. 150–157.
14. Kostin, A.S. “Information-measuring systems for monitoring the aircraft trajectory.” *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy. Materialy XXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Vol. 1. SPb.: GUAP, 2021. 219–226.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Костин Антон Сергеевич — аспирант, ассистент
Научный руководитель:
Майоров Николай Николаевич
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: anton13258@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kostin, Anton S. — Postgraduate, assistant
Supervisor:
Maiorov, Nikolai N.
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
email: anton13258@mail.ru

Майоров Николай Николаевич —

доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Кучко Дмитрий Витальевич — аспирант

Научный руководитель:

Майоров Николай Николаевич
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: sciencesuai@yandex.ru

Maiorov, Nikolai N. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Saint-Petersburg State University

of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,

St. Petersburg, 190000,

Russian Federation

e-mail: nmsoft@yandex.ru

Kuchko, Dmitry V. — Postgraduate
Supervisor:

Maiorov, Nikolai N.

Saint-Petersburg State University

of Aerospace Instrumentation

67/A Bol'shaya Morskaya Str.,

St. Petersburg, 190000,

Russian Federation

e-mail: sciencesuai@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 мая 2024 г.

Received: May 24, 2024.