

Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 739—749.

Hydrometeorology and Ecology. 2024;(77):XX—XX.

ГЕОИНФОРМАТИКА. ОБЗОР

Научная статья

УДК 004.942:551.509.3:629.735

doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-739-749

Геоинформационный подход к построению оптимального маршрута беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям

Софья Евгеньевна Максимова^{1, 2}, Степан Владимирович Духин²

¹ Российский университет транспорта, Москва, Россия, sofya.maksimova.1992@mail.ru

² АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте»

Аннотация. В настоящее время продолжается интенсивный рост применения беспилотных воздушных судов (БВС) для решения различных задач. Современное метеорологическое обеспечение полетов в значительной степени ориентировано на пилотируемую авиацию. В ходе анализа технических характеристик БВС установлены параметры, на которые следует ориентироваться при планировании полета. Для выявления участков, в которых выполнение полета БВС может быть подвергнуто повышенному риску авиационных инцидентов или происшествий в определенный момент времени по причине несоответствия погоды эксплуатационным характеристикам судна, могут быть использованы геоинформационные системы.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, метеоэлемент, геоинформационные системы, модели прогноза погоды.

Для цитирования: Максимова С. Е., Духин С. В. Геоинформационный подход к построению оптимального маршрута беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям // Гидрометеорология и экология. 2024. № 77. С. 739—749. doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-739-749.

Original article

Geoinformation approach to constructing an optimal route for an unmanned aerial vehicle taking into account meteorological restrictions***Sofya E. Maksimova^{1, 2}, Stepan V. Duhin²***¹ Russian University of Transport, Moscow, Russia² JSC “Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport”

Summary: Currently, there continues to be an intensive growth in the use of civil unmanned aerial vehicles to solve various problems. To model the optimal route for an unmanned aerial vehicle, it is necessary to take into account many factors, including meteorological restrictions. Modern meteorological support for flights is largely focused on manned aircraft. When planning a flight, unmanned aerial vehicle pilots spend a lot of time studying the weather forecast. They study information on the Internet on sites that are not focused on providing information for aviation. Technical characteristics of the unmanned aerial vehicle various types on the Internet and in flight manuals were studied and analyzed. In order to identify meteorological restrictions, pilots should focus on information about the operating environment temperature, wind speed, IP class, availability a ban on flight operations in conditions of thunderstorms, hail, rain, fog, etc. for a specific type or single instance of an unmanned aerial vehicle. Geographic information systems are used to solve various problems in the field of meteorology. Geographic information systems are used both to analyze information about atmospheric processes and phenomena, and to solve applied meteorological problems. The software can be used to identify areas where a particular type of unmanned aerial vehicle may be at increased risk of incidents or accidents at a given time due to weather conditions not suiting the aircraft's operational characteristics. The use of geoinformation tools for analyzing discrete fields of spatio-temporal distribution of meteorological elements can form an array of information for a decision support system for constructing unmanned aerial vehicle optimal routes.

Keywords: unmanned aerial vehicle, weather element, geoinformation systems, weather forecast models.

For citation: Maksimova S. E., Duhin S. V. Geoinformation approach to constructing an optimal route for an unmanned aerial vehicle taking into account meteorological restrictions. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(77):739—749. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-77-739-749.

Введение

В настоящее время в гражданской авиации продолжается интенсивный рост применения беспилотных воздушных судов¹ (далее — БВС) для авиационных работ и воздушных перевозок. Пользователи воздушного пространства в сроки, определенные требованиями нормативно-правовых документов, подают представление на установление местного или временного режима и план полета. В некоторых случаях отдельными положениями разрешено выполнение полета

¹ Беспилотное воздушное судно — воздушное судно, управляемое, контролируемое в полете пилотом, находящимся вне борта такого воздушного судна (внешний пилот). Пункт 5 статьи 32 Федерального закона от 19.03.1997 № 60-ФЗ «Воздушный кодекс Российской Федерации».

БВС без установления режима. Основными проблемами автоматизированного планирования полета БВС в трехмерном пространстве являются обоснованность и безопасность моделирования, а также точность решения и способность алгоритмов к глобальной оптимизации в сложных географических условиях [1]. При планировании безопасного полета БВС требуется изучить значительный объем пространственной информации о рельефе местности, зданиях и сооружениях, информацию о структуре воздушного пространства, прогнозируемой погоде по маршруту полета.

Для моделирования оптимального маршрута полета БВС из точки взлета в точку посадки необходимо учитывать не только ограничения, связанные с нормативно-правовыми аспектами организации воздушного движения в воздушном пространстве РФ, но и ограничения по метеорологическим условиям в соответствии с техническими характеристиками БВС. Метеорологические факторы оказывают существенное влияние на взлет, посадку и полет по маршруту БВС [2]. В частности, в работе [2] рассмотрено влияние ветра на дальность и продолжительность полета БВС, зависимость вероятности авиационного происшествия с БВС самолетного и вертолетного типа от скорости ветра. Игнорирование или недостаточное внимание к метеорологическим факторам в ходе подготовки к полету снижает эффективность применения БВС. Причем имеет значение не только анализ прогноза погоды на краткосрочный период, но и тенденции распределения значений метеозлементов в году. Приведены результаты анализа показателей исследуемого района за календарный год. Представлен пример визуализации ограничений в пространстве для полета БВС самолетного типа по метеорологическим условиям. В работе [3] изучено влияние дестабилизирующих воздействий на БВС в полете. Среди дестабилизирующих воздействий природного характера указаны такие факторы, как влияние ветра, температуры воздуха, влажности. Авторы работы [4] в ходе решения задачи по построению оптимального маршрута полета БВС моделируют ограничение по неблагоприятным метеорологическим условиям в виде полигонов, в границах которых перемещение невозможно.

Зарубежные исследователи также уделяют внимание моделированию оптимальных маршрутов полетов БВС гражданской авиации с учетом метеорологических условий. В статье [5] приводится описание негативного воздействия метеорологических факторов на пилотирование БВС. В работе [6] представлен подход к оптимизации траектории полета БВС самолетного типа в модели среды реалистичного микрорайона континентальной Европы. Для моделирования городского климата используется система PALM¹. Автор проанализировал полученные траектории полета и подтвердил, что оптимизация маршрута полета БВС снижает потребление энергии. Авторы работы [7] предлагают построение трехмерной модели, в которой каждой ячейке назначается вероятность неблагоприятных погодных условий, которая периодически обновляется. Данная модель используется в качестве исходных данных для построения оптимального маршрута перемещения БВС.

¹ PALM (PARallelized LES (Large-eddy simulation) Model) — система метеорологического моделирования потоков воздуха, разработанная Ганноверским университетом.

При подготовке и выполнении полета БВС внешние пилоты руководствуются в том числе метеорологической информацией. Во время пилотирования в метеорологических условиях, не соответствующих требованиям документов по эксплуатации БВС, значительно увеличивается риск авиационного инцидента или происшествия.

Объектом настоящего исследования являются ограничения для полетов БВС по метеорологическим условиям. Объект изучается с учетом следующих аспектов: технические характеристики БВС, анализ доступной для внешних пилотов информации о прогнозируемой погоде, анализ полей распределения значений метеозлементов. Цель работы — выполнить обзор применимости геоинформационного подхода к построению оптимальных маршрутов перемещения БВС из точки старта в точку назначения с учетом ограничений по метеорологическим условиям.

Обсуждение и результаты исследований

Современная авиация не может функционировать без обслуживания метеорологической информацией и прогнозов погоды. Метеорологическое обеспечение выполняется в целях обеспечения безопасности, регулярности и эффективности полетов [8]. Обеспечение метеорологической информацией пользователей воздушного пространства РФ регламентировано Федеральными авиационными правилами «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов», утвержденными Приказом Министерства транспорта РФ от 3 марта 2014 г. N 60 (далее — ФАП-60), разработанными в соответствии со стандартами и рекомендуемой практикой Приложения 3 к Конвенции о международной гражданской авиации «Метеорологическое обеспечение международной авиации». Данный нормативно-правовой документ регламентирует порядок выполнения метеонаблюдений на аэродроме, предоставление информации о фактической и прогнозируемой погоде экипажам воздушных судов, органам Единой Системы Организации Воздушного Движения¹ (далее — ЕС ОрВД), пользователям метеорологической информации, обеспечивающим полеты воздушных судов, а также работу с авиационной климатологической информацией.

Метеорологическая информация предоставляется в виде сообщений-сво-док (TAF, METAR, SPECI, AIRMET, SIGMET, GAMET² и других) установленной нормативными документами формы, которые составлены метеорологическим органом, содержат метеорологическую информацию для выполнения полетов; также представлены в виде карт особых явлений погоды и прогностических карт ветра и температуры. Сообщения TAF, METAR, SPECI и пр. содержат информацию о погоде на аэродроме, AIRMET и SIGMET — о погоде по маршруту полета

¹ Постановление Правительства Российской Федерации от 28 августа 2015 г. №901 «О Единой системе организации воздушного движения Российской Федерации».

² TAF — Terminal Aerodrom Forecast, METAR — METeorological Aerodrome Report, SPECI — SPECIal Weather Report, AIRMET — AIRman's METeorological Information, SIGMET Significant Meteorological Information, GAMET — General Aviation Meteorological Information.

воздушного судна, GAMET — о погоде в районе полетной информации¹ или его субрайоне (подрайоне). При этом зональные прогнозы используются в качестве прогнозов погоды по вертодромам² и посадочным площадкам. Метеорологическое обеспечение, регламентируемое ФАП-60, в значительной степени ориентировано на пилотируемую авиацию. Информация предоставляется о погоде в целом, без учета специфики типа воздушного судна.

Значительное количество стартов и посадок БВС выполняется не с аэродромов и вертодромов, а со стартово-посадочных площадок, не внесенных в документы аэронавигационной информации. Полеты БВС часто выполняются на небольшие расстояния, несопоставимо меньшие по сравнению с районами прогнозирования погоды. Многие внешние пилоты при подготовке к полету руководствуются в том числе сведениями в сети Интернет, содержащимися на геосервисах с прогнозами погоды, не ориентированными на предоставление информации для планирования полетов воздушных судов.

Современные геосервисы, в которых пользователи могут взять картографическую информацию о структуре воздушного пространства [9], дополнительно предоставляют сведения о метеорологической ситуации. Однако в данных ресурсах не предусмотрена возможность автоматизированного построения ограничений в соответствии с техническими характеристиками типа или единичного экземпляра БВС по пространственно-временному распределению метеоэлементов.

Таким образом, анализ информации о прогнозируемой погоде в районе выполнения полета производится внешними пилотами с учетом технических характеристик БВС без использования инструментов ГИС-анализа. С учетом необходимости обработки значительного объема информации вручную могут возникать значительные временные затраты для выполнения качественного изучения прогнозируемой погоды по маршруту полета, которые можно снизить благодаря применению моделирования в ГИС. Анализ прогнозируемой погоды средствами ГИС необходим для поддержки принятия решений в рамках планирования полета.

Геоинформационные системы используются как для анализа информации об атмосферных процессах и явлениях, так и для решения прикладных метеорологических задач (в том числе в области синоптической метеорологии) в условиях недостаточной плотности метеостанций. Для прогнозирования погоды выполняется восстановление некоторых полей пространственного распределения метеорологических элементов: температура и характеристики влажности воздуха у поверхности земли, атмосферное давление на уровне моря, барическая тенденция, облачность, осадки и т.д. [10].

¹ «район полетной информации» — воздушное пространство определенных размеров, в пределах которого обеспечиваются полетно-информационное обслуживание и аварийное оповещение (Пункт 2 Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 11 марта 2010 г. №138). В свою очередь, субрайон — часть района полетной информации.

² Вертодром — участок земли или определенный участок поверхности сооружения, предназначенный полностью или частично для взлета, посадки, руления и стоянки вертолетов. (Пункт 1.1 статьи 40 Федерального закона от 19.03.1997 № 60-ФЗ «Воздушный кодекс Российской Федерации»).

При наличии глобальных моделей прогноза погоды (GFS, IFS, ПЛАВ, UKMet¹ и другие) много внимания уделяется исследованию физического состояния атмосферы на региональном уровне. При анализе мезомасштабных возмущений атмосферной циркуляции с учетом интерполяции полей давления и температуры воздуха у поверхности земли необходимо принимать во внимание влияние рельефа местности на восстанавливаемую метеорологическую величину и ее фактические горизонтальные и вертикальные градиенты [11]. Геоинформационные системы используются для интеграции и анализа большого объема пространственной информации из различных систем наблюдения (в частности, данные, получаемые сетью метеорологических станций, а также данные дистанционного зондирования Земли). Комплексирование различной информации, характеризующей одну и ту же метеорологическую величину с учетом достоинств каждой системы получения информации и минимизации ее ошибок, позволяет повысить качество анализа этой величины [12, 13]. Сформированные уточненные поля пространственно-временного распределения метеорологических величин могут быть использованы в качестве мезомасштабного сигнала в глобальных и региональных моделях прогноза погоды.

Задача по моделированию оптимального маршрута перемещения БВС предполагает анализ фактической и прогнозируемой метеорологической обстановки с целью определения областей, недоступных для выполнения полета, а также уверенность в том, что значения метеозадающих элементов по траектории перемещения находятся в пределах эксплуатационных ограничений БВС.

В ходе изучения и анализа технических характеристик БВС, опубликованных на сайтах производителей в сети Интернет и руководств летной эксплуатации, установлено, что для выявления ограничений по метеорологическим условиям следует ориентироваться на информацию о температурном диапазоне рабочей среды, скорости ветра, степени защиты оболочки (класс IP), наличие запрета на выполнение полета в условиях грозы, града, дождя, тумана и пр. для конкретного типа или единичного экземпляра БВС.

Температурный диапазон рабочей среды БВС — это диапазон от минимальной до максимальной рабочей температуры окружающей среды, при котором БВС работает в штатном режиме. При планировании полета БВС следует учитывать понижение температуры воздуха с набором высоты.

Показатель *максимально допустимой скорости ветра* предполагает максимальное значение скорости перемещения воздуха за единицу времени, при которой БВС способен выполнять полет. Если скорость ветра превышает максимально допустимое значение, пилотируемый БВС подвергается повышенной опасности.

¹ GFS (Global Forecast System), IFS (Integrated Forecasting System), ПЛАВ (ПолуЛарганжева, основанная на уравнении Абсолютной завихренности), UKMet (the United Kingdom Met Office's model) — модели прогнозирования погоды, разработанные Национальной службой по мониторингу атмосферы и океана США (NOAA), Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), Гидрометцентром России совместно с Институтом вычислительной математики РАН, Метеорологической службой Соединенного Королевства соответственно.

Степень защиты оболочки (класс IP¹) — класс степени защиты согласно стандартам (IEC² 60529, DIN³ 40050), обеспечиваемый оболочкой БВС от попадания внешних твердых предметов (частиц) или частиц осадков. По значению первой цифры в классе возможно определить защиту от частиц определенного диаметра, пыли или пыленепроницаемость, по значению второй цифры — защиту от влаги (каплепадения, дождевания, обрызгивания и т. д.). По значению IP можно определить способность БВС выполнить полет в условиях наличия в атмосфере пыли, града или капель дождя определенного диаметра.

В руководстве летной эксплуатации типа БВС или иных документах может быть установлен *запрет на выполнение полетов в условиях грозы, града, дождя, тумана* и пр. В этом случае для того, чтобы описать ограничение на полет, следует ориентироваться еще и на нижнюю границу облаков. В случае, если в документах содержится *запрет на выполнение полета БВС в облаке*, для корректного описания ограничения следует использовать такие параметры, как: нижняя граница облаков и их вертикальная протяженность. Безусловную опасность для БВС представляют *облака вулканических извержений*.

Анализ полей пространственно-временного распределения значений метеоэлементов выполняется согласно формуле (1):

$$I_{(x,y,z,t)} = \Phi_{\text{бвс}}(m), \quad (1)$$

где $I_{(x,y,z,t)}$ — ячейка пространства по координатам x, y, z в момент времени t ; m — значение метеоэлемента; $\Phi_{\text{бвс}}$ — функция, определяющая соответствие метеоэлемента ограничениям для типа или единичного экземпляра БВС.

Таким образом, ячейке пространства по координатам x, y, z в момент времени t присваиваются значения в диапазоне от 0 до 1, означающие меру соответствия или несоответствия эксплуатационным ограничениям для полета БВС. Совокупность смежных ячеек пространства, в которых невозможен полет БВС по причине действия ограничений по метеорологическим условиям, следует объединить. Ограничение для перемещения БВС принимает вид многогранника в момент времени, которое можно выразить уравнением (2):

$$C_i = \Phi \left\{ [P_1(X_1, Y_1, Z_1), P_2(X_2, Y_2, Z_2), \dots, P_n(X_n, Y_n, Z_n)], (t), (A) \right\}, \quad (2)$$

где P_n — n -я точка многоугольника; X_n — абсолютная широта точки; Y_n — абсолютная долгота точки; Z_n — абсолютная высота точки; t — время; A — факт ограничения по метеорологическим параметрам.

Тогда совокупность пространственно-временных ограничений следует выразить по формуле (3):

$$Zm = (Zm_i, i = 1, N), \quad (3)$$

где Zm — совокупность ограничений в воздушном пространстве для конкретного полета БВС по планируемой траектории перемещения; Zm_i — i -е ограничение.

¹ Ingress Protection — защита от проникновения.

² International Electrotechnical Commission — Международная электротехническая комиссия (МЭК).

³ Deutsches Institut für Normung — Немецкий институт стандартизации.

Полученные результаты исследования могут послужить основой геоинформационного подхода к моделированию оптимального маршрута перемещения беспилотного воздушного судна с учетом ограничений по метеорологическим условиям.

Вычисление оптимального маршрута перемещения БВС гражданской авиации из точки старта в точку назначения с установлением местного или временного режима предполагает построение модели соответствующего сегмента воздушного пространства, в котором есть различные ограничения. Воздушным законодательством предусмотрено наличие элементов, ограничивающих перемещение БВС: запретные зоны, опасные зоны, воздушное пространство над населенными пунктами, приграничная полоса и другие. Указанные ограничивающие элементы локализованы в границах, описанных с применением пар координат, высоты, интервалов времени. Для БВС с конкретным бортовым номером или для отдельной категории БВС может быть сделано исключение из ограничения.

Таким образом, для вычисления воздушного пространства, доступного для построения оптимального маршрута перемещения БВС, необходимо исключить («стереть») в модели сегмента воздушного пространства участки с пространственно-временными ограничениями, в которых временный или местный режим не может быть установлен. Кроме того, необходимо исключить участки, в границах которых полет невозможен по причине несоответствия погоды техническим характеристикам типа или единичного экземпляра БВС. Формула, описывающая воздушное пространство, в котором возможно моделировать оптимальный маршрут полета конкретного БВС из точки старта в точку назначения, выглядит следующим образом (4):

$$ВП_j = ВП - (Z_{вп} - Z_{искл}) - Z_m, \quad (4)$$

где $ВП_j$ — воздушное пространство, доступное для планирования полета j -го БВС, $ВП$ — сегмент воздушного пространства, $Z_{вп}$ — совокупность ограничений в воздушном пространстве для j -го БВС, $Z_{искл}$ — совокупность исключений из ограничений в воздушном пространстве для j -го БВС.

В полнофункциональных геоинформационных системах реализованы инструменты построения оптимальных маршрутов перемещения. Кроме того, предусмотрена возможность интеграции скриптов на языке программирования Python. Инструменты построения оптимальных маршрутов перемещения на основе алгоритма Дейкстры используют графы пространственных данных. В данном случае модель сегмента воздушного пространства выполнена в виде графа, вершины которого расположены с интервалом¹ 10 м по высоте. При наличии ограничения в воздушном пространстве, в границах которого полет БВС невозможен по причине несоответствия значений метеоэлементов его техническим характеристикам,

¹ Размеры графа пространственных данных предложены на основании Приказа Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении Инструкций по разработке, установлению, введению и снятию временного и местного режимов, а также кратковременных ограничений» от 27.06.2011 №171, Приказа Министерства транспорта Российской Федерации «Об утверждении табеля сообщений о движении воздушных судов в Российской Федерации» от 24.01.2013 №13 и личного профессионального опыта авторов по подготовке планов полетов и представлений на установление местных и временных режимов.

из пространственного графа данный участок исключается. Оставшимся ребрам присваиваются значения, отражающие степень соответствия метеорологических условий техническим характеристикам j -го БВС. При этом получившийся граф становится входными данными для алгоритмов вычисления оптимального маршрута перемещения БВС в воздушном пространстве.

Заключение

В статье обсуждается необходимость метеорологического обеспечения для планирования полетов БВС гражданской авиации и предложен конкретный подход к учету ограничений по метеорологическим условиям в геоинформационном моделировании воздушного пространства для построения оптимальных маршрутов перемещения БВС. Научная новизна состоит в необходимости построения модели сегмента воздушного пространства в рамках геоинформационной системы в виде графа пространственных данных, в котором исключены («стерты») участки, где выполнение полетов невозможно по причине несоответствия метеорологических условий техническим характеристикам БВС. Это позволяет выполнить автоматизированное построение оптимального маршрута полета БВС с применением алгоритма Дейкстры и его модификаций.

Выявлены параметры, на которые следует ориентироваться при планировании полета. К ним относятся температурный диапазон рабочей среды БВС, максимально допустимая скорость ветра, степень защиты оболочки (класс IP), запрет на выполнение полетов в условиях грозы, града, дождя, тумана, запрет на выполнение полета БВС в облаке, невозможность пилотировать в условиях наличия облаков вулканических извержений.

Для функционирования инструмента автоматизированного построения оптимального маршрута полета БВС из точки старта в точку назначения необходима корректная модель воздушного пространства, в которой должны быть учтены основные принципы организации воздушного движения и физико-географические факторы, значимые для пилотирования БВС. В настоящее время построение маршрутов полетов из точки старта в точку назначения выполняется внешними пилотами вручную, специализированного метеорологического обеспечения для полетов БВС не предусмотрено, соответственно, автоматизированное геозонирование воздушного пространства по степени приемлемости выполнения полета невозможно. Все вышеперечисленное увеличивает издержки от выполнения полетов по субоптимальным маршрутам и увеличивает риск авиационных инцидентов и происшествий.

Список литературы

1. Yin S., Yang J., Ma L. et al. An Enhanced Whale Algorithm for Three-Dimensional Path Planning for Meteorological Detection of the Unmanned Aerial Vehicle in Complex Environments // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 60039—60057. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3394055.
2. Горбунов А. А., Галимов А. Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала //

- Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2016. №2. С. 7—15.
3. Кузнецов И. Е., Мельников А. В., Рогозин Е. А., Страшко О. В. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Том 45. №2. С.125—139. doi:10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139.
 4. Лавренков К. Е., Шевелёва А. П., Романов О. Т., Машкин М. Н. Задача выбора оптимального маршрута беспилотного летательного аппарата при противодействующих, географических и погодных ограничениях в области полёта // Инновационные технологии в проектировании и производстве. 2021. №4. С.22—28. doi: 10.52190/2073-2597_2021_4_22.
 5. Gao M., Hugenholtz C., Fox T. et al. Weather constraints on global drone flyability // Scientific Reports. 2021. V. 14. P. 309—312. doi: 10.1038/s41598-021-91325-w.
 6. Rienecker H., Hildebrand V., Pfifer H. Energy optimal 3D fight path planning for unmanned aerial vehicle in urban environments // CEAS Aeronautical Journal. 2023. Vol. 14. P. 621—636. doi: 10.1007/s13272-023-00666-x.
 7. Zhang B., Tang L., Roemer M. Probabilistic Weather Forecasting Analysis for Unmanned Aerial Vehicle Path Planning // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2014. Vol. 37. P. 309—312. doi: 10.2514/1.61651.
 8. Болелов Э. А. Метеорологическое обеспечение полетов гражданской авиации: проблемы и пути их решения // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Том 21. №5. С.117—129. doi: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129
 9. Максимова С. Е. Геопорталы для планирования полетов беспилотных воздушных судов в воздушном пространстве Российской Федерации // Наука и технологии железных дорог. 2023. №26. С. 47—52.
 10. Фалейчик Л. М. Геоинформационное обеспечение численного моделирования локальных атмосферных процессов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2012. Том 10. Вып. 2. С. 14—24.
 11. Калинин Н. А., Ветров А. Л., Смирнова А. А. Мезомасштабный анализ и сверхкраткосрочный прогноз погоды // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2009. Том 151. Вып. 4. С.209—216.
 12. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 53—60.
 13. Калинин Н. А., Смирнова А. А. Численный анализ данных радиолокационных дистанционных измерений облачности // Метеорология и гидрология. 2003. № 7. С. 31—39.

References

1. Yin S., Yang J., Ma L. et al. An Enhanced Whale Algorithm for Three-Dimensional Path Planning for Meteorological Detection of the Unmanned Aerial Vehicle in Complex Environments. *IEEE Access*. 2024; (12): 60039—60057. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3394055.
2. Gorbunov A. A., Galimov A. F. The influence of meteorological factors on the use and flight safety of unmanned aerial vehicles with side repeater radio. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MCHS Rossii = Bulletin of St. Petersburg University of the Emergency Ministry Russia State Fire Service*. 2016; (2): (7—15). (In Russ.).
3. Kuznetsov I. E., Melnikov A. V., Rogozin E. A., Strashko O. V. Methodology for accounting the influence of meteorological factors on the efficiency of application of unmanned aerial vehicles on the basis of system analysis. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2018; 45(2): (125—139). (In Russ.). doi:10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139
4. Lavrenov K. E., Shevelyova A. P., Romanov O. T., Mashkin M. N. The problem of choosing the optimal route for an unmanned aerial vehicle with opposing, geographic and weather restrictions in the flight area. *Innovatsionnyye tekhnologii v proyektirovanii i proizvodstve = Information technology of CAD/CAM/CAE*. 2021; (4): (22—28). doi: 10.52190/2073-2597_2021_4_22. (In Russ.).

5. Gao M., Hugenholtz C., Fox T. et al. Weather constraints on global drone flyability. *Scientific Reports*. 2021; (14): 309—312. doi: 10.1038/s41598-021-91325-w.
6. Rienecker H., Hildebrand V., Pfifer H. Energy optimal 3D fight path planning for unmanned aerial vehicle in urban environments. *CEAS Aeronautical Journal*. 2023, (14): 621—636. doi: 10.1007/s13272-023-00666-x.
7. Zhang B., Tang L., Roemer M. Probabilistic Weather Forecasting Analysis for Unmanned Aerial Vehicle Path Planning. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*. 2014; (37): 309—312. doi: 10.2514/1.61651.
8. Bolelov E. A. Meteorological support for civil aviation flights: problems and ways of their solution. *Nauchny vestnik MGTU GA = Scientific bulletin of MSTU C.A.* 2018; 21(5): (117—129). doi: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-117-129. (In Russ.).
9. Maksimova S. E. Geoportals for unmanned aerial vehicles planning flights in the Russian Federation airspace. *Nauka i tehnologii zheleznih dorog = Railway science and technology*. 2023; (26): (47—52). (In Russ.).
10. Faleychik L. M. GIS support for numerical modeling of local atmospheric processes. *Vestnic NGU. Seria: Informacionnye tehnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2012; 10(2): (14—24). (In Russ.).
11. Kalinin N. A., Vetrov A. L., Smirnova A. A. Mesoscale Analysis and Ultra Short-term weather forecast. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki = Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*. 2009; 151(4): (209—216). (In Russ.).
12. Kalinin N. A., Smirnova A. A. Combined use of radar and station observations for cloud field analysis. *Meteorologia i gidrologia = Meteorology and hydrology*. 2002; (8): (53—60). (In Russ.).
13. Kalinin N. A., Smirnova A. A. Numerical analysis of cloud radar remote sensing data. *Meteorologia i gidrologia = Meteorology and hydrology*. 2003; (7): (31—39). (In Russ.).

Информация об авторах

Максимова Софья Евгеньевна, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», аспирант III года обучения кафедры «Геодезия, геоинформатика и навигация»; АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», ведущий специалист отдела спутникового мониторинга, sofya.maksimova.1992@mail.ru.

Духин Степан Владимирович, кандидат технических наук, АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте», начальник научно-технического комплекса геоинформационных систем и спутниковых технологий, duhin.s@yandex.ru.

Information about authors

Maksimova Sofya E., Russian University of Transport, 3rd year postgraduate student of the Department of Geodesy, Geoinformatics and Navigation; JSC “Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport”, leading expert of the satellite monitoring department, sofya.maksimova.1992@mail.ru.

Dukhin Stepan V., Candidate of Technician Sciences, JSC “Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport”, Head of the Scientific and Technical Complex of Geoinformation Systems and Satellite Technologies, duhin.s@yandex.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.04.2024

Принята после доработки в печать 20.11.2024

The article was received on 22.04.2024

The article was accepted after revision on 20.11.2024