

УДК 004.02

## ОРБИТАЛЬНО-ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ МАРШРУТОВ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

М. А. ГЕТЬМАН<sup>1</sup>, Т. З. АРАЛБАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>deprivedofwonders@gmail.com, <sup>2</sup>atz1953@gmail.com

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (ОГУ)

Поступила в редакцию 24.09.2020

**Аннотация.** В статье предложены графоаналитические модели для описания и исследования маршрутов движения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Описаны особенности и недостатки построения графовых моделей в задачах маршрутизации движения БПЛА, разработаны алгоритм и программное средство для анализа маршрутов полетов в задаче мониторинга распределенных объектов нефтедобычи. Предложены рекомендации по применению разработанной модели и программного средства.

**Ключевые слова:** граф маршрутов; беспилотный летательный аппарат; орбитально-графовая модель.

### ВВЕДЕНИЕ

Графовые модели являются одним из основных средств описания исходных данных и решения задач разработки маршрутов движения объектов и передачи информации. В настоящее время широкое применение данный вид моделей получил при составлении и выборе оптимальных маршрутов БПЛА. Анализ публикаций по теме статьи позволил выявить ряд концептуальных особенностей в вопросах постановки задач маршрутизации, использования типовых проектных решений и представления результата разработчику. В частности, это касается вопросов человеко-машинного интерфейса [1, 2] при составлении начальных планов маршрутов, постановки логистической задачи, вопросов автоматической формализации описания задания и выбора математического аппарата для обработки исходных данных [3–5], визуализации и анализа результатов [6]. Анализ перечисленных работ определил в них наличие следующих особенностей и недостатков:

– высокая трудоемкость и малая иллюстративность представления графовых моделей маршрутов на этапе постановки задачи;

– функциональная неполнота интерфейса, обеспечивающего мониторинг процесса обработки и анализа маршрутов.

К основным требованиям к методам и средствам решения задачи маршрутизации БПЛА отнесены:

– сокращение времени решения задачи описания, анализа и построения оптимального маршрута;

– повышение удобства работы с компьютерными средствами, что снижает трудоемкость исследований и повышает достоверность результата.

Целью работы является повышение эффективности задания и исследования маршрутов БПЛА на основе разработки орбитально-графовых моделей.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

– построены картографическая и модифицированная орбитально-графовые модели

(ОГМ) маршрутов БПЛА над распределенным технологическим объектом, в частности объектом нефтедобычи;

- разработан алгоритм и программное средство ОГМ для анализа маршрутов;
- предложены рекомендации для использования ОГМ.

Целевая функция исследований в виде коэффициента автоматизации  $K_a$  представлена следующим образом:

$$K_a = N_a / N_o \rightarrow 1, \\ T_p \leq T_t, D_p \geq D_t, Z_p \leq Z_t,$$

где  $N_a, N_o$  – количество автоматизированных и всех функций, выполняемых в задаче маршрутизации БПЛА, соответственно;

- $T_p, T_t$  – реальное и требуемое человеко-машинное время выполнения задачи маршрутизации соответственно;
- $D_p, D_t$  – реальная и требуемая оценка достоверности принятых решений соответственно;
- $Z_p, Z_t$  – реальные и требуемые стоимостные затраты на аппаратно-

программные средства решения задачи маршрутизации соответственно.

### КАРТОГРАФИЧЕСКАЯ ОРБИТАЛЬНО-ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ

В процессе исследований на примере реальных объектов [7–10] построена ОГМ маршрутов БПЛА при мониторинге распределенных систем мониторинга объекта нефтедобычи, представленная на рис. 1. При описании модели дуговые стрелки соответствуют направлению движения БПЛА при облете узлов в замкнутых контурах маршрутов:  $K1, K2$  и  $K3$ .

Начальной точкой является вершина 1, из которой БПЛА имеет возможность осуществить полет по 3 возможным маршрутам:  $\{1, 2, 3, 7, 1\}, \{1, 4, 5, 6, 1\}$  и  $\{1, 4, 5, 6, 7, 1\}$ . Расстояния между узлами на местности обозначены как  $r1-r9$ .

Орбиты на рис. 1 определяются радиусами концентрических окружностей направления перемещения БПЛА из начальной точки.

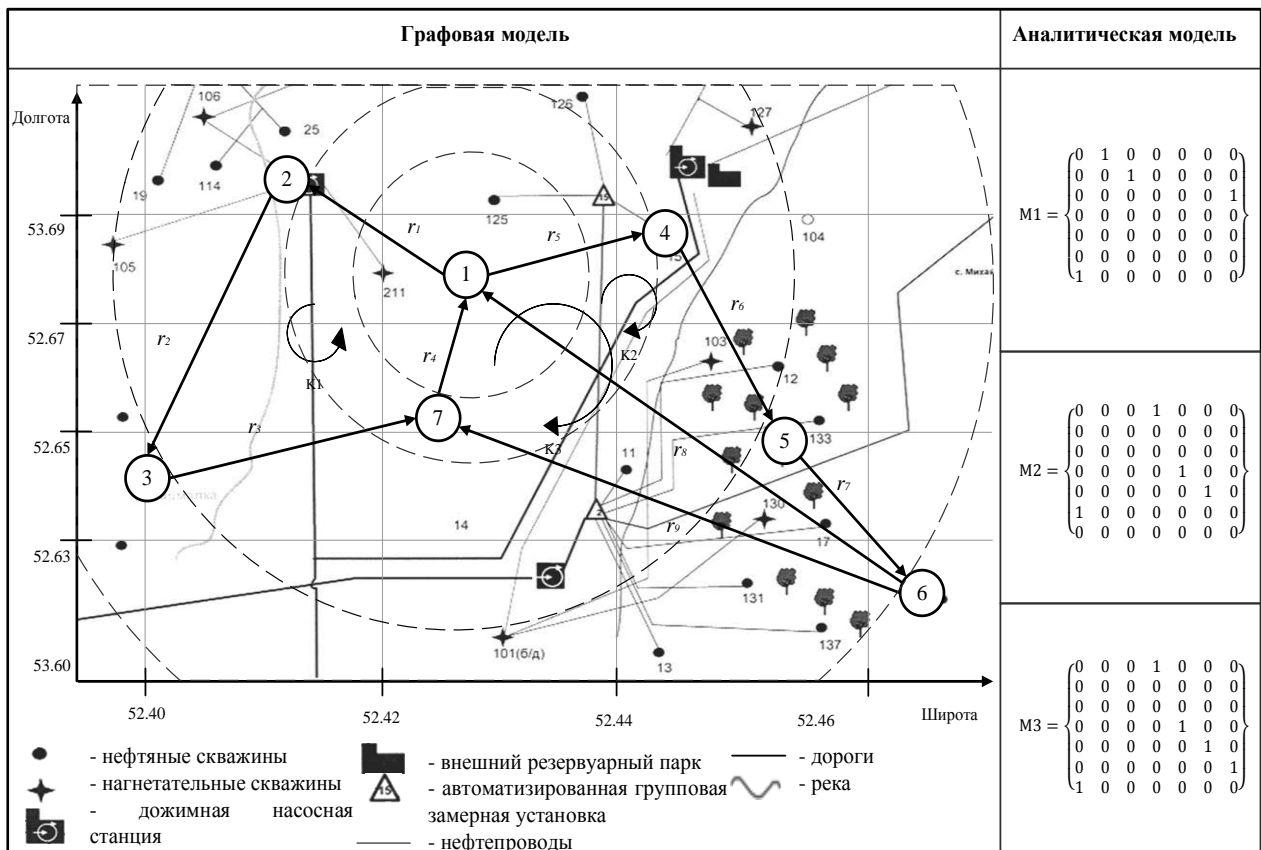


Рис. 1. Картографическая орбитально-графовая модель маршрутов БПЛА при мониторинге распределенного объекта нефтедобычи

Матрицы смежности графов  $M1, M2, M3$  для соответствующих маршрутов по контурам  $K1, K2, K3$  представляют собой аналитическую часть модели.

Матричное описание графов позволяет решать целый ряд задач маршрутизации, связанных с анализом и оптимизацией полетов БПЛА на основе различных модификаций ОГМ.

#### МОДИФИЦИРОВАННАЯ ОРБИТАЛЬНО-ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ

На рис. 2 представлен вариант модифицированной ОГМ для автоматизации процедур формализованного описания графов маршрутов из рис. 1, их анализа и предложения результатов исследования пользователю.

На рис. 2 каждая орбита представляет собой геометрическое место для размещения одинаковых вершин графов различных маршрутов или одного маршрута с множеством разветвлений из одной вершины, а ребра характеризуют параметры перехода (перелета) БПЛА от одного узла на местности к другому.

Такое представление маршрутов позволяет:

- в формате одного рисунка получить представление о нескольких графах или контурах одного сложного графа;
- избежать пересечения ребер в пространстве рисунка;
- избежать визуального сравнения графов путем перемещения контуров по орбитам и наложения их друг на друга;

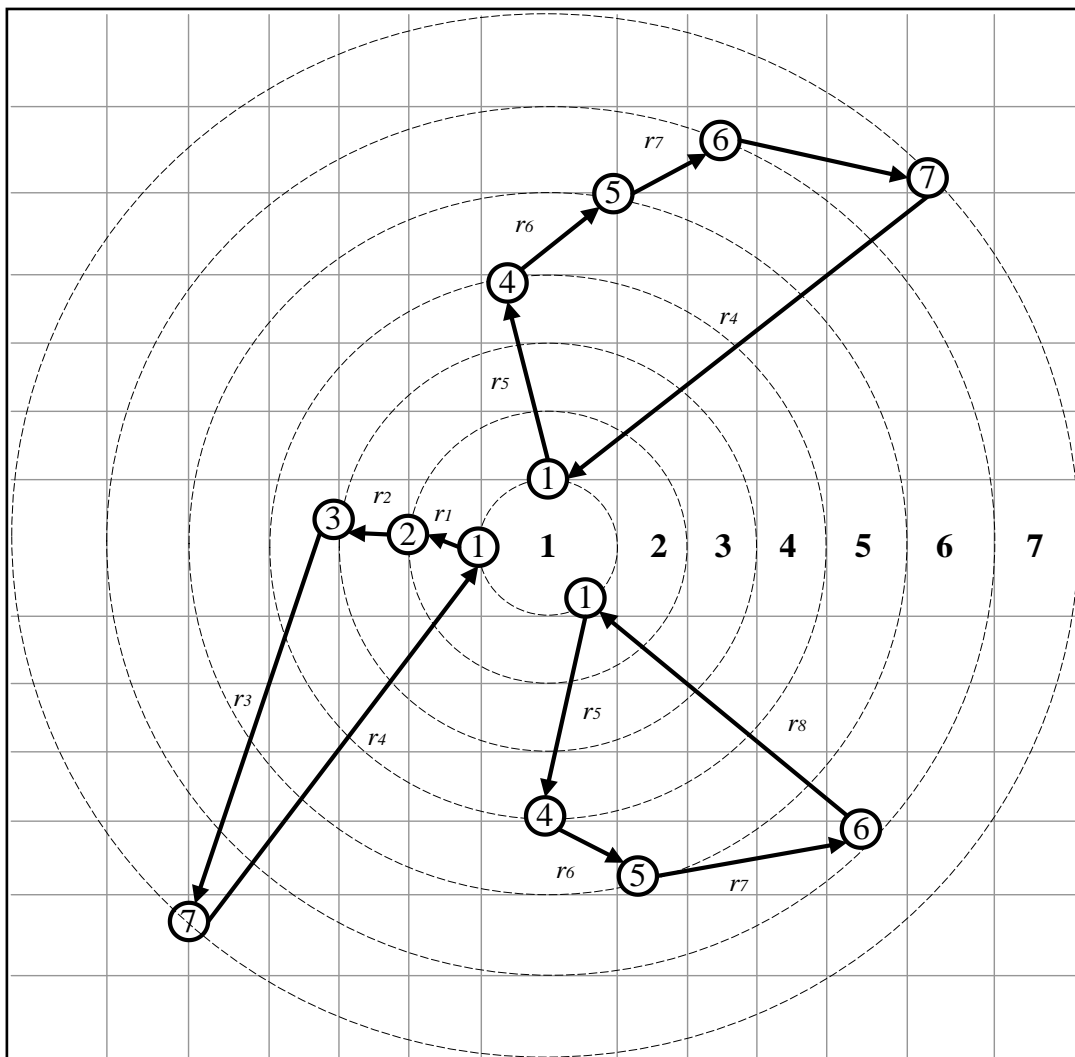


Рис. 2. Модифицированная схема орбитально-графовой модели маршрутов БПЛА

– решать задачи матричной обработки характеристик графов с использованием специализированных алгоритмов и программных средств.

**АНАЛИЗ МАРШРУТОВ НА ОСНОВЕ ОРБИТАЛЬНО-ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ**

На рис. 3 представлен алгоритм программы [11], реализующий человеко-машинный интерфейс в задаче описания и обработки графов маршрутов БПЛА.

Экранная форма работы программы представлена на рис. 4. Число орбит задано в соответствии с числом вершин построенного ранее графа маршрутов БПЛА (рис. 1).

В качестве примера на рис. 4 представлены два режима анализа графов маршрутов.

В первом режиме анализируется наличие переходов (фрагментов графов) между вершинами в маршрутах.

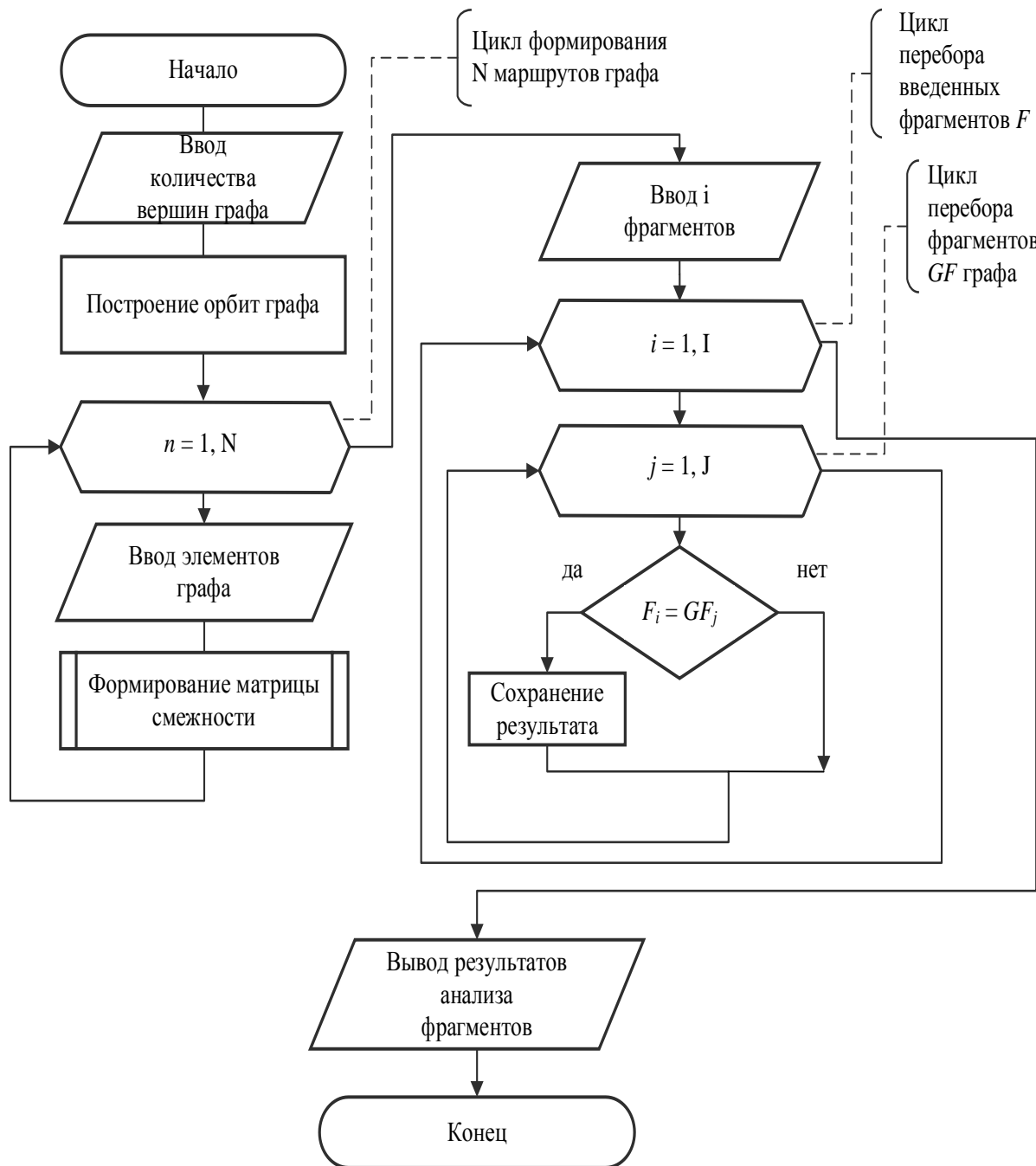


Рис. 3. Схема алгоритма ОГМ в задаче анализа фрагментов в маршрутах

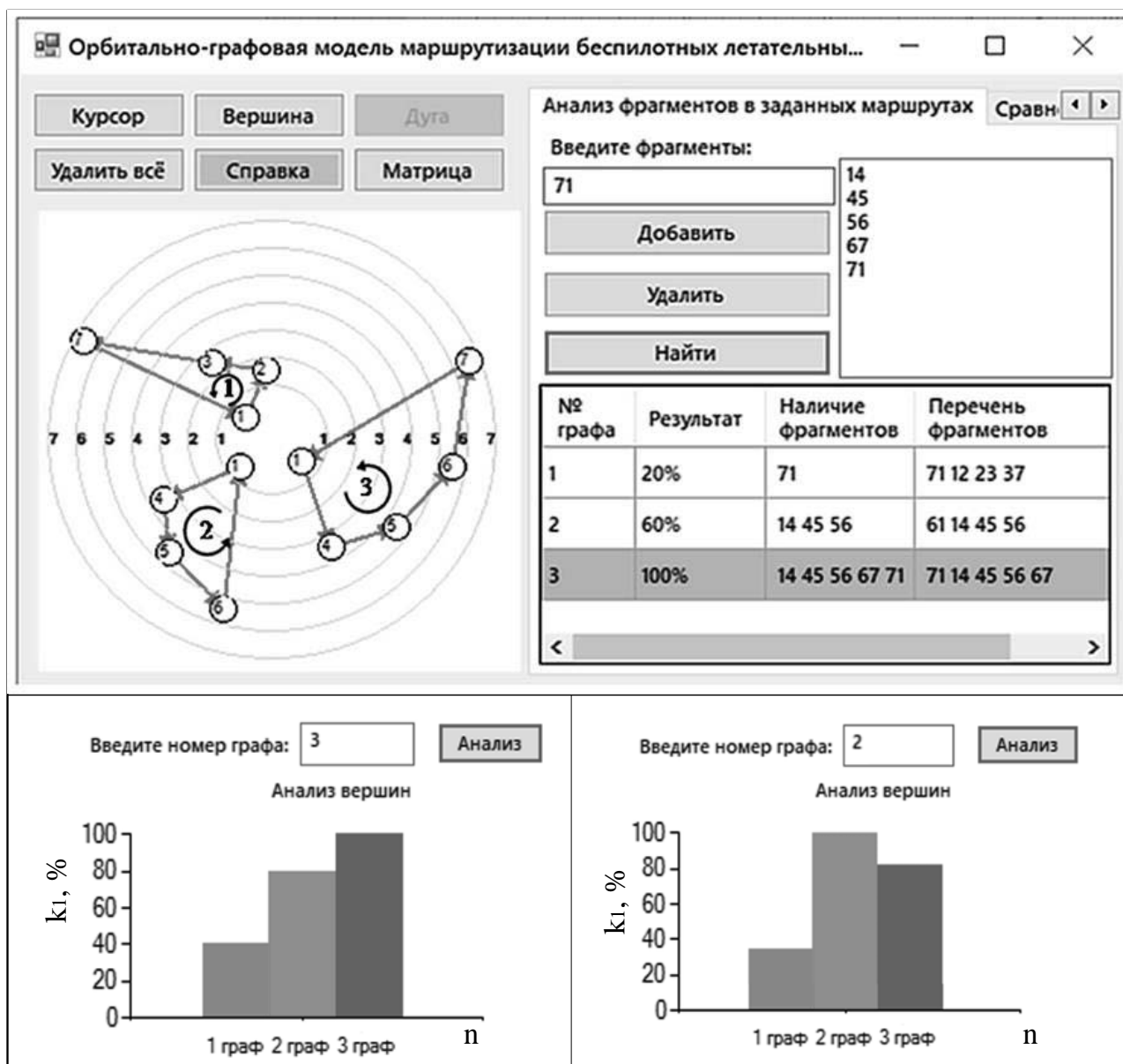


Рис. 4. Экранная форма программ применения ОГМ в задаче анализа фрагментов в маршрутах

Во втором режиме анализируется подобие исследуемых графов по числу одинаковых вершин и переходов между ними.

Гистограммы характеризуют подобие (сходство) исследуемых графов между собой, в частном примере – по числу общих узлов по величине коэффициента подобия  $k_1$ .

#### РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНО-ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Отличительными особенностями рассмотренной программы от аналогов [5, 9] являются возможность построения в одном графическом пространстве нескольких маршрутов, расширение функциональных возможностей

при решении задач планирования маршрутов различных воздушных и наземных средств мониторинга распределенных промышленных объектов. Представленные результаты могут быть интегрированы в существующие логистические системы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты разработки орбитально-графовых моделей, а также их применения в задаче построения маршрутов БПЛА на примере мониторинга распределенного объекта нефтедобычи.

Использование разработанного программного средства позволяет повысить эффек-

тивность задания и выбора маршрутов на основе улучшения возможностей человеко-машинного интерфейса.

Представленный подход, по мнению авторов, является весьма перспективным в направлении совершенствования графической части интерфейса, связанного с сегментацией концентрических орбит, введением полярных координат векторов маршрутов и применением методов топологического наложения контуров маршрутов. Не менее перспективным является совершенствование методов матричной обработки в аналитической части моделей, расширяющее возможности исследования маршрутов в задачах логистики, маршрутизации и распознавания образов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сверчков Д. С.** Разработка человеко-машинного интерфейса и его применение в системах управления // Труды Крыловского государственного научного центра. СПб.: КГНЦ, 2018. С. 184–190. [ D. S. Sverchkov, "Development of the human-machine interface and its application in control systems", in *Proceedings of the Krylov state scientific center (KSSC 2018)*, St. Petersburg, 2018, pp. 184-190. ]
2. **Башлыков А. А.** SCADA-системы как средства построения современных человеко-машинных систем управления в нефтепроводном транспорте // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 4. С. 6–16. [ A. A. Bashlikov, "SCADA systems as a means of building modern human-machine control systems in oil pipeline transport", in *Avtomatizaciya, telemekhanizaciya i svyaz v nef-tyanoj promyshlennosti*, no. 4, pp. 6-16, 2013. ]
3. **Михеева Т. И., Михеев С. В., Головнин О. К.** Система формирования полетных планов для беспилотного летательного аппарата // Перспективные информационные технологии: труды Международной научно-технической конференции. Самара: СГУ, 2017. С. 669–672. [ T. I. Mikhееva, S. V. Mikhееv, O. K. Golovnin, "Flight plan generation system for an unmanned aerial vehicle", (in Russian), in *Proc. Int. Workshop on Advanced information technologies (SSU 2017)*, 2017, pp. 669-672. ]
4. **Метод** построения маршрутов беспилотного летательного аппарата на интерактивной электронной карте / Е. В. Чекина [и др.] // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений: труды Всероссийской научной конференции. Уфа: УГАТУ, 2019. С. 1–6. [ E. V. Chekina, et al., "Method for constructing routes for an unmanned aerial vehicle on an interactive electronic map", (in Russian), in *Proc. all-Russian Workshop on Information technologies of intellectual desicion support (USATU 2019)*, 2019, pp. 1-6. ]
5. **Мельников А. В., Гайдай В. А., Рогозин Е. А.** Построение оптимальной траектории полета беспилотного летательного аппарата при выполнении задачи поиска // Вестник ВГИ МВД России. 2017. Т. 1, № 1. С. 52–62. [ A. V. Melnikov, V. A. Gaidai, E. A. Rogozin, "Building an optimal flight path for an unmanned aerial vehicle when performing a search task", (in Russian), in *Vestnik VGI MVD Rossii*, vol. 1, no. 1, pp. 52-62, 2017. ]
6. **Извекова Л. А.** Формализация задачи коммутации узлов в локальной сети с резервным каналом связи // Студенческие научные достижения: сборник Международного научно-исследовательского конкурса. Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 26–30. [ L. A. Izvekova, "Formalizing the task of switching nodes in a local network with a backup communication channel", (in Russian), in *Student scientific achievements: collection of the int. research competition*. Penza, 2020, pp. 26-30. ]
7. **Оптимизация** методов контроля технического состояния распределенных автоматизированных систем в условиях воздействия пространственно-временных угроз на основе мониторинга сетевых информационных потоков: монография / Т. З. Аралбаев [и др.]. Оренбург: ОГУ, 2018. 160 с. [ T. Z. Aralbaev, et al., *Optimization of methods for monitoring the technical condition of distributed automated systems under the influence of spatio-temporal threats based on monitoring of network information flows*, (in Russian). Orenburg: OGU, 2018. ]
8. **Аралбаев Т. З., Абрамова Т. В.** Анализ пространственно-временной модели угроз для распределенной автоматизированной системы управления процессом транспортировки нефтегазового сырья // Вестник УГАТУ. 2020. Т. 24, № 1 (87). С. 76–84. [ T. Z. Aralbaev, T. V. Abramova, "Analysis of a spatio-temporal threat model for a distributed automated control system for the transportation of oil and gas raw materials", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 24, no. 1 (87), pp. 76-84, 2020. ]
9. **Прикладная** программа «Метод определения вероятностных маршрутов распространения вредоносного кода» / Т. З. Аралбаев [и др.]. Оренбург: ОГУ, 2020 [Электронный ресурс]. URL: [https://ufer.osu.ru/index.php?option=com\\_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer\\_id=2129](https://ufer.osu.ru/index.php?option=com_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer_id=2129) (дата обращения 15.07.2020). [ T. Z. Aralbaev, et al. (2020, Jul. 15). *Application program "Method for determining probabilistic routes for malicious code propagation"* [Online]. Available: [https://ufer.osu.ru/index.php?option=com\\_uferdb-search&view=uferdbsearch&action=dtails&ufer\\_id=2129](https://ufer.osu.ru/index.php?option=com_uferdb-search&view=uferdbsearch&action=dtails&ufer_id=2129) ]
10. **Аралбаев Т. З., Галимов Р. Р.** Структурно-параметрический и структурно-топологический синтез распределенных систем контроля и управления объектами нефтегазодобычи: монография. Уфа: Гилем, 2010. 143 с. [ T. Z. Aralbaev, R. R. Galimov, *Structural-parametric and structural-topological synthesis of distributed control and management systems for oil and gas production facilities*, (in Russian). Ufa: Gilem, 2010. ]
11. **Гетьман М. А., Аралбаев Т. З.** Прикладная программа «Орбитально-графовая модель маршрутизации беспилотных летательных аппаратов» [Электронный ресурс]. URL: [https://ufer.osu.ru/index.php?option=com\\_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer\\_id=2186](https://ufer.osu.ru/index.php?option=com_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer_id=2186) (дата обращения 15.07.2020). [ M. A. Getman, T. Z. Aralbaev (2020, Jul. 15). *Application program "An orbital-graph model for routing unmanned aerial vehicles"* [Online]. Available: [https://ufer.osu.ru/index.php?option=com\\_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer\\_id=2186](https://ufer.osu.ru/index.php?option=com_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer_id=2186) ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ГЕТЬМАН Мария Аликовна**, вед. инж., маг. каф. вычислит. техники и защиты информации ОГУ. Дипл. «Информационная безопасность» (ОГУ, 2019).

**АРАЛБАЕВ Ташбулат Захарович**, проф. каф. вычислит. техники и защиты информации ОГУ. Дипл. инж.-электр. (1975). Д-р техн. наук (ОГУ, 2004). Иссл. в обл. контроля и диагностики вычислит. и инфокоммуникац. систем и сетей.

#### METADATA

**Title:** Orbital-graph model of flight routes for unmanned aerial vehicles.

**Authors:** M. A. Getman<sup>1</sup>, T. Z. Aralbaev<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Orenburg State University (OSU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>deprivedofwonders@gmail.com, <sup>2</sup>atz1953@gmail.com

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 4 (90), pp. 94-100, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article offers a graph-analytical model for describing and investigating the routes of unmanned aerial vehicles (UAVs). The article describes the peculiarities and disadvantages of constructing graph models in the problems of UAV traffic routing, and substantiates the feasibility of using cluster analysis in its research. An orbital graph was constructed for the problem of monitoring a transport pipeline, and an algorithm and software tool were developed that implement this model. The OGM is applied in the task of analyzing fragments in the specified routes.

**Key words:** route graph; unmanned aerial vehicle; orbital graph model.

**About authors:**

**GETMAN, Mariya Alikovna**, leading engineer, undergraduate student, Dept. of Computing and Information Security (OSU). Dipl. Information Security (OSU, 2019).

**ARALBAEV, Tashbulat Zakharovich**, Prof., Dept. of Computing and Information Security (OSU). Dipl. Electrical Engineer (1975). Dr. of Tech. Sci. (OSU, 2004).