

## **Using the Mathematical Apparatus of Cellular Automata to Solve the Problem of Monitoring Critical Infrastructure Objects by Unmanned Aerial Vehicles**

**Chistov V., Zakharchenko I., Pavlenko V., Pavlenko M., Berdnik P., Timochko A., Kryzhevskaya K.**

Kharkiv National Air Force University named after Ivan Kozhedub  
Kharkiv, Ukraine

**Abstract.** The purpose of this work is the development of mathematical tools for formalizing decision-making problems in open expert real-time control systems. The goal was achieved by defining and formally describing all the elements of a formal system. The most significant result was the proposed approach to formalization. With its help, within the framework of a single formalism, the dynamic properties of the subject area and the logical-analytical activity of the power system dispatcher, presented in different classes of formal logics, were described. The significance of the results obtained lies in the possibility of a rigorous description of various aspects of knowledge within the framework of a single formal apparatus with further pragmatic interpretation in the management process. The proposed approach was distinguished by using the axioms of alethic and deontic logics and the development of axioms that reflect the specifics of the problems being solved. The introduced system of basic concepts and relations makes it possible to classify many decision-making problems for the power systems management. The goals were described within the framework of a single formalism form the basis of the apparatus for formalizing the decision-making problems of the class under consideration. The formalization apparatus provides a description of the dynamic properties of the system within each aspect of knowledge of the content paradigm. The direction of further research is the construction of an appropriate formal theory based on the proposed formal system.

**Keywords:** control system, decision-making system, power system, real time, target setting, formal system.

**DOI:** <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.12>

**UDC:** 621.311: 004.584

### **Utilizarea aparatului matematic al automatelor celulare pentru rezolvarea problemei monitorizării obiectelor de infrastructură critică de către vehicule aeriene fără pilot**

**Cistov V., Zakharchenko I., Pavlenko V., Pavlenko M., Berdnik P., Timociko A., Kryzhevskaya K.**

Harkiv National Air Force University Ivan Kozhedub  
Harkiv, Ukraine

**Rezumat.** Scopul acestei lucrări este de a crește eficiența și de a reduce costurile economice în procesul de monitorizare a obiectelor de infrastructură critică de către un grup de obiecte în mișcare în diferite condiții prin utilizarea aparatului matematic al automatelor celulare. Scopul este atins prin reducerea la minimum a timpului de zbor al vehiculelor aeriene fără pilot, definierea și descrierea formală a procesului de monitorizare, determinarea numărului necesar de grupuri de monitorizare și menținerea nivelului de conștientizare cu privire la obiectele de observare. Construcția modelelor formale se bazează pe aparatul automatelor celulare, ceea ce face posibilă descrierea unor modele comportamentale complexe și implementarea mecanismelor naturale existente pentru rezolvarea unor astfel de probleme. Cele mai importante rezultate sunt o descriere formală a spațiului de soluționare a problemei, proprietățile obiectelor care interacționează, precum și strategiile elaborate pentru comportamentul unui automat celular, care face posibilă implementarea diferitelor modele comportamentale sau strategii pentru rezolvarea problemei, precum și pe măsură ce crește eficiența și calitatea problemei care se rezolvă. Semnificația rezultatelor obținute constă în posibilitatea rezolvării unei probleme complexe de optimizare multicriterială a găsirii rutei de deplasare a unui grup de vehicule aeriene fără pilot pentru monitorizarea obiectelor de infrastructură critică. Soluția acestei probleme va optimiza costurile economice ale monitorizării, va îmbunătăți eficiența și calitatea monitorizării și, de asemenea, va crește acoperirea obiectelor de monitorizare. Abordarea propusă pentru implementarea automatelor celulare va permite crearea unui sistem eficient de monitorizare a stării obiectelor de urmărire, care va minimiza numărul și compoziția grupurilor de monitorizare.

**Cuvinte-cheie:** sistem de monitorizare, UAV, sistem de alimentare, automate celulare, optimizare, clustering.

**Использование математического аппарата клеточных автоматов для решения задачи мониторинга объектов критической инфраструктуры беспилотными летательными аппаратами**  
**Чистов В.В., Захарченко И.В., Павленко В.М., Павленко М.А., Бердник П.Г., Тимочко А.И.,**  
**Крыжевская Е.В.**

Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба  
 Харьков, Украина

**Аннотация.** Целью данной работы является повышение оперативности и снижения экономических затрат в процессе мониторинга объектов критической инфраструктуры группой подвижных объектов в различных условиях за счет использования математического аппарата клеточных автоматов. Поставленная цель достигается путем минимизации времени полета беспилотных летательных аппаратов, определения и формального описания процесса мониторинга, определения необходимого количества мониторинговых групп, поддержания уровня информированности об объектах наблюдения. В основу построения формальных моделей положен аппарат клеточных автоматов, который позволяет описать сложные поведенческие модели и реализовать существующие природные механизмы решения подобных задач. Наиболее существенными результатами являются формальное описание пространства решения задачи, свойств взаимодействующих объектов, а также разработанные стратегии поведения клеточного автомата, что позволяет реализовать различные поведенческие модели или стратегии решения задачи, а также повысить оперативность и качество решаемой задачи. Значимость полученных результатов состоит в возможности решения сложной задачи многокритериальной оптимизации по нахождению маршрута передвижения группы беспилотных летательных аппаратов для мониторинга объектов критической инфраструктуры. Решение данной задачи позволит оптимизировать экономические затраты на реализацию мониторинга, повысить оперативность и качество производимого мониторинга, а также повысит охват объектов мониторинга. Таким образом проведенные исследования показали эффективность использования клеточных автоматов для решения задач поиска маршрутов при поиске и мониторинге объектов критической инфраструктуры в различных условиях. Использование предложенного аппарата позволяет так же решать задачи подбора характеристик групп поиска, их численного состава и количества групп поиска для решения различных задач. Так же полученные результаты показали независимость результатов и эффективности работы клеточного автомата от начальных условий. Предложенный подход к реализации клеточных автоматов позволит создать эффективную систему мониторинга за состоянием объектов наблюдения, что позволит минимизировать количество и состав групп мониторинга.

**Ключевые слова:** система мониторинга, БПЛА, энергосистема, клеточный автомат, оптимизация, кластеризация.

## ВВЕДЕНИЕ

Задача мониторинга состояния объектов критической инфраструктуры, к которым относятся и объекты генерации и распределения электроэнергии, является трудно реализуемой и актуальной при проведении планово-предупредительных осмотрах, мониторинге правил безопасной эксплуатации, оценки состояния объектов инфраструктуры и других мероприятиях. Эти задачи могут быть классифицированы по нескольким признакам: известны координаты или нет, известно количество объектов или нет, объекты поиска динамичны или статичны, различные характеристики размера, пространственная разнесённость, связность объектов и т.д. Одним из перспективных подходов к решению задачи мониторинга таких объектов, может быть использование беспилотных летательных аппаратов, которые позволяют проводить мониторинг разнесенных

объектов, а также объектов большой протяженности, расположенных в местах трудной доступности.

В соответствии с этим будут выбираться различные методы поиска и перемещения над объектами, а также методы построения маршрутов передвижения групп мониторинга. Так, например, если неизвестны координаты объектов поиска будут использоваться методы прочесывания, подразумевающие полное сканирование участков местности, а при полностью известных координатах могут использоваться методы поиска кратчайших путей на графе или другие подобные методы.

В реальной жизни не всегда удается свести задачи поиска целей и прокладки маршрута к какому либо, из известных методов поиска объектов и пути подвижной группы в силу различных ограничений. Такими ограничениями могут быть: рельеф местности, неопределенность в характеристиках объектов, частичное знание о положении объектов, трудная доступность

объектов, неопределенность в возможности преодоления некоторых областей пространства и другие факторы.

Рассмотрим более подробно вопрос о том, что такое подвижная группа. Под подвижной группой будем понимать группу однородных объектов, совершающих процедуры поиска целей и действующих совместно. Примером такой группы может быть пешая группа поиска, группа на автомобилях, группа беспилотных летательных аппаратов и т.д. Т.е. в общем случае это группа объектов, действующих совместно и способная изменять свое положение в пространстве. Далее в статье под подвижной группой будем понимать группу беспилотных летательных аппаратов, реализующих задачу поиска и мониторинга состояния объектов энергетического комплекса и других объектов критической инфраструктуры.

В таких условиях стоит вопрос о выборе метода решения задачи поиска объектов и прокладки маршрута движения подвижной группы, а также исследование возможности данного математического аппарата.

Известно большое количество подходов к решению данной задачи, однако основное внимание в данной статье будет посвящено аппарату клеточных автоматов для решения подобной задачи.

Рассмотрим существующие подходы к решению подобных задач.

### *Анализ литературы*

Методы поиска группой подвижных объектов реализованы в программных продуктах, широко применяемых в военных операциях, мониторинге земельных участков, спасательных и поисковых миссиях. Задания поиска группой делятся на ряд частных задач, одной из которых является поиск стратегии поведения объектов группы для достижения определенных целей.

Вопросу построения маршрута движения с целью поиска объекта посвящен ряд работ [1]-[4]. Большинство методов, для поиска движущихся объектов или поиска маршрутов для группового движения, построены с использованием классических алгоритмов поиска на графах, венгерского метода, поиска в глубину, нейронных сетей или их комбинации.

Особое внимание уделяется вопросам создания роев беспилотных летательных аппаратов. Так в публикациях [1, 16, 17]

разработаны структуры системы роя беспилотных систем, обеспечивающая возможность адаптации к изменению среды или технической неисправности членов группы. В рамках разработанной структуры создано два пакета управления: пакет управления роем и пакет управления миссией. Преимуществом разработанной структуры является возможность изменения структуры роя в соответствии с количеством и ролью объектов в группе для достижения цели. Однако вопросы поиска движущегося объекта группой не рассматривались.

Особое внимание уделяется вопросам прокладки маршрутов передвижения беспилотных систем. Так в работах [2, 19, 20] разработан метод планирования маршрута движения группы беспилотных летательных аппаратов с реализацией на платформе ROS. В работе использован протокол связи MAVLink и автопилот Pixhawk. Определение оптимального маршрута группы осуществляется для типичных ситуаций алгоритмом A-star, в нетипичных ситуациях распределение объектов осуществляется венгерским методом с целью минимизации пути. Следует отметить, что венгерский метод требует значительного времени для решения и не позволяет учитывать показатели датчиков и сенсоров группы.

Публикации [3, 18, 20, 27, 28] посвящены решению задач планирования маршрутов движения беспилотных летательных аппаратов для поиска (подтверждения состояния) стационарных объектов. Разработанный метод позволяет получить оценку степени важности и информированности о состоянии стационарных объектов для их поиска (подтверждения).

Особое внимание уделено алгоритму планирования маршрута Deep-Sarsa [4, 29, 30], направленному на поиск маршрута с уклонением от препятствий, построенный с использованием глубокой нейронной сети на основе обучения с подкреплением. Алгоритм (Deep-Sarsa) основан на комбинации методов поиска по глубине (алгоритм поиска на графе) и алгоритма обучения с подкреплением (Sarsa). Для выполнения функций нейронная сеть должна быть обучена и перенесена в среду моделирования, что требует значительного времени и ресурсов.

Однако большинство методов не рассматривают возможность группового

характера действий объектов, их динамику или являются ресурсоемкими по времени и имеют высокую вычислительную сложность. Учитывая особенности решения оптимизационной задачи подобной сложности, целесообразно использование метаэвристических методов, построенных на принципах подражания поведению объектов живой природы. Достоинства и недочеты метаэвристических подходов, принципов построения и работы рассмотрены в трудах [5], [6].

Использование моделей живой природы при решении задач поиска посвящена публикация [7], в которой разработан метод оптимизации, основанный на стратегии поиска пищи морскими хищниками и их взаимодействия с добычей.

Особого внимания заслуживают метаэвристические алгоритмы группового поиска [8, 23, 24] Group search optimizer (GSO), основанный на принципах поведения животных, поиск стратегии достижения цели осуществляется путем определения максимумов/минимумов целевой функции.

Разработанный в работе [9] алгоритм Spotted Hyena Optimizer (SHO) основывается на социальном поведении пятнистых гиен. В алгоритме заложено моделирование этапов поиска пищи животными: поиск добычи, окружение и нападение.

Для моделирования и воспроизведения поведения объектов живой природы широкое распространение получили клеточные автоматы благодаря их относительной простоте и гибкости. Принципы построения и моделирования клеточных автоматов рассмотрены в работах известных авторов [10], [11]. Ряд работ [18]-[26] доказывает эффективность использования клеточных автоматов для поиска стратегий поведения группы объектов и моделирования свойств среды, для которой рассматривается решаемая задача.

Ряд работ посвящен [12, 24, 25, 26, 27] исследованию коллективного поведения клеточных автоматов, а именно их способности к восстановлению и регенерации. Разработанная модель клеточного автомата показывает сложное поведение группы и позволяет идентифицировать правила поведения клеточного уровня.

Еще одна попытка формализации поведения клеточного автомата на основе существующих моделей живой природы

приведена в работе [13]. В данной статье рассмотрена стратегия поиска движущихся объектов однородными группами с использованием клеточного автомата, основывающаяся на правилах поведения групп объектов живой природы. В работе использовано и проведено описание однородной клеточной решетки с установленными границами, отражающей условия и ограничения реальных задач при поиске объектов в заданной области пространства. Доказана эффективность и практическая значимость разработанного автомата поиска маршрутов с заданным временем и точностью работы.

Особое внимание уделено в работе [14] моделированию опорно-двигательного аппарата человека для воспроизведения в робототехнике с помощью клеточного автомата. Разработанные правила клеточного автомата позволяют прогнозировать состояние системы, основываясь на двух предыдущих состояниях.

В работе [15] разработана модель движения агентов на основе клеточного автомата, исследующая динамику движения объектов при выполнении боевых задач и учитывающая необходимость изменения стратегии поведения агентов.

Анализ литературы свидетельствует о перспективности разработки моделей коллективного поведения на основе клеточных автоматов. Не решенным вопросом остается поиск объектов интереса группой, а именно генерация стратегий поведения объектов группы, позволяющих достичь определенную цель с учетом ограничений внешней среды, свойств объекта поиска и возможностей группы.

## МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В продолжении идей, изложенных в работах [13, 12, 15] будем рассматривать в качестве исходной модели группы подвижных объектов – группу действующую в соответствии с моделью поведения косяка рыб [12, 13].

Как и в работах [12, 13] для задач рассматриваемого класса предлагается использовать клеточный автомат на плоскости, соответствующей решаемой задаче.

Тогда двумерный клеточный автомат можно определить, как множество конечных

автоматов на плоскости с координатами, которые могут находиться в одном из возможных состояний [21,22]:

$$\theta_{i,j} \in S = \{0,1,2,3,\dots,k\}. \quad (1)$$

На каждом шаге работы автомата происходит изменение состояния автомата в соответствии с правилом:

$$\theta_{i,j}(t+1) = \phi(\theta_{k,l}(t)(k,1) \in N(i,j)), \quad (2)$$

где  $N(i,j)$  - окружение автомата  $(i,j)$ .

В работе будем использовать определение окружения автомата как окружение Мура [11]:

$$N_M(i,j) = \{k,l | |i-k| \leq 1, |j-l| \leq 1\}. \quad (3)$$

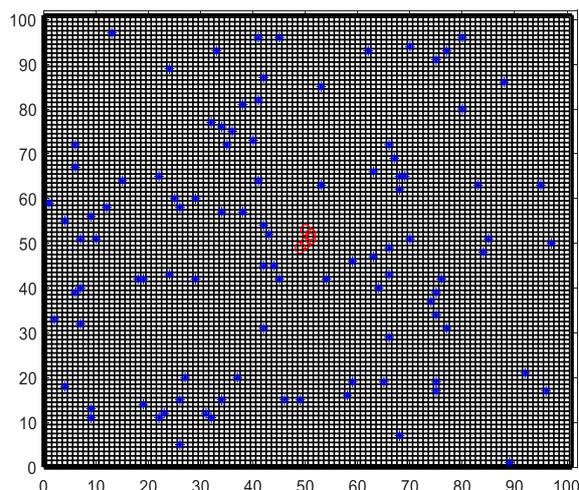
Количество возможных правил перехода определяется количеством возможных состояний  $\theta$  и количеством рассматриваемых соседей  $m$ . Теоретически количество таких правил может быть равно:  $\Psi = \theta^{m^m}$ , что позволяет строить различные наборы правил для конструирования различных стратегий поведения клеточного автомата.

Анализ формулы (2), (3) свидетельствует о том, что с помощью правил может быть описано достаточно сложное поведение клетки и обеспечено рассмотрение большого количества возможных состояний. Рассмотрим данные формальные описания на практике в соответствии с целями данной статьи.

Определим однородную двумерную сетку с координатами на плоскости (рис. 1). Данная сетка обычно сворачивается в сферу, то есть нижний край сетки стыкуется с верхним, а левый край с правым. Такая свертка обычно используется для простоты проведения расчетов и предотвращения связанных с этим проблем [8]. Однако, в нашем случае, предлагается использовать ограниченную решетку с границами (пример приведен на рис. 1). На рисунке 1 и других, расположенных ниже, красным цветом показано начальное положение группы летательных аппаратов.

Учитывая особенности решения задачи поиска и мониторинга объектов критической инфраструктуры для разработки правил поведения клеточного автомата, будем использовать автоматы двух типов: объекты поиска (обозначены знаком \*) и группа поиска

(знак **o**) (рис. 1).



**Рис. 1. Двухмерная однородная сетка для работы клеточного автомата.**

**Fig. 1. Two-dimensional homogeneous grid for the operation of a cellular automata.**

В качестве базы для поиска правил поведения клеточного автомата используем стратегию совместного движения группы к цели.

Используем простейшую модель поведения: автомат движется к объекту, который наиболее близок к группе.

Взяв за основу стратегию поведения «движение к ближайшему объекту», можно сформулировать следующие правила поведения клеточного автомата.

Стратегия ПЦ1.

1. Объекты поиска не движутся. Объекты заданы множеством  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ , каждый объект имеет координаты  $c_k(x_i, y_j)$ .

2. Объекты поиска имеют показатель важности (значимости, "массы", осведомленности)  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ .

3. Группа поиска  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_g\}$ ,  $o_g(x_i, y_j)$  движется согласованно, не изменяя своего построения.

4. На каждом шаге работы клеточного автомата группа поиска изменяет своё положение.

5. Все расчеты производятся относительно центра массы группы, который определяется при помощи формулы:

$$O_{ЦМ}(x, y) = \left( \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L x_l, \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L y_l \right), \quad (4)$$

Где  $(x_l, y_l)$  координаты клеточных автоматов, которые принадлежат группе поиска.

6. Автоматы группы поиска могут определить расстояние до объектов относительно центра массы группы.

7. Автоматы группы поиска движутся в направлении наиболее близкого объекта.

В предыдущих работах было показано, что наиболее интересных результатов удалось достичь при реализации стратегии поиска к «наиболее близкому объекту», либо при реализации стратегии «разбиения пространства на кластеры относительно центра группы поиска» и «поиск внутри кластера» при реализации стратегии ПЦЗ, приведенные ниже.

Стратегия ПЦЗ:

Правила 1-5 будут идентичны правилам ПЦ1.

6. Рассчитывается функция значимости объекта, которая связывает между собой удаленность от объекта до центра группы поиска и его «массы».

Формально это может быть задано следующим образом:

$$f(c_{ij}, O_{ЦВ}) = \left(1 - \frac{L_{c_{ij}}}{L_{\max}}\right) + \frac{m_{c_{ij}}}{m_{\max}},$$

где:  $L_{c_{ij}}$  - расстояние от цели  $c_{ij}$  до центра группы поиска  $O_{ЦВ}$ ;

$L_{\max}$  - максимальное расстояние от всех целей  $S = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  до центра группы поиска  $O_{ЦВ}$ ;

$m_{c_{ij}}$  - «важность» («масса») цели  $c_{ij}$ ;

$m_{\max}$  - максимальная «важность» («масса») целей  $S = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ .

7. Автомат движется к цели, которая имеет максимальное значение функции  $f(c_{ij}, O_{ЦВ})$ .

Рассмотренный подход позволяет породить автомат ПЦ4.

Стратегия ПЦ4:

Правила 1-5 будут идентичны правилам ПЦ1.

6. Определяются объекты, которые попадают в кластер радиуса  $R$ .

7. Рассчитывается функция значимости объекта, которая связывает между собой расстояние от объекта до центра группы поиска и его «массы». Правило 6 ПЦЗ.

8. Автомат движется к цели, которая имеет максимальное значение функции

$f(c_{ij}, O_{ЦВ})$ .

9. Если целей в кластере нет происходит движение к следующему кластеру.

Проведенные результаты исследования данных клеточных автоматов позволили установить их высокую эффективность и подтвердили эффективность их использования.

Тогда в ходе исследования возник вопрос о возможности разбиения объектов поиска на кластеры не зависимо от свойств объектов (по сути пространственное разбиение) и обхода уже полученных кластеров.

Для этого все объекты, представленные на рис. 1, были разбиты на кластеры заданного радиуса  $R_0$ .

Разбиение происходило по следующему алгоритму:

1. Находился 1 произвольный объект.
2. Центру кластера присваивались координаты 1-го объекта.
3. Находился следующий объект.
4. Рассчитывался центр кластера как среднее координат всех объектов.

5. Осуществлялась проверка вхождения всех ранее выбранных объектов в кластер с радиусом  $R_0$ .

6. Если все объекты попадают осуществляется переход к пункту 3. Если какие-то, ранее выбранные объекты не попадают то объект отбрасываются и осуществляется переход к пункту 3 пока не будут рассмотрены все объекты.

7. Если есть еще объекты, которые не вошли ни в один кластер осуществлялся переход к пункту 1.

В результате работы данного алгоритма были получены результаты представленные на рис. 2.

Таким образом было получено 17 кластеров со следующими координатами (табл. 1).

Проведенные исследования работы данного автомата позволили получить следующие результаты.

Использование стратегии ПЦ1 внутри кластеров и реализация стратегии ПЦ1 для кластеров позволило получить следующий результат (рис. 3). Данный эксперимент был завершён за 556 шагов. Сравнение результатов работы с автоматом без разбиения на кластеры показало, что автомат при реализации стратегии ПЦ 1 показал следующий результат (рис. 4).

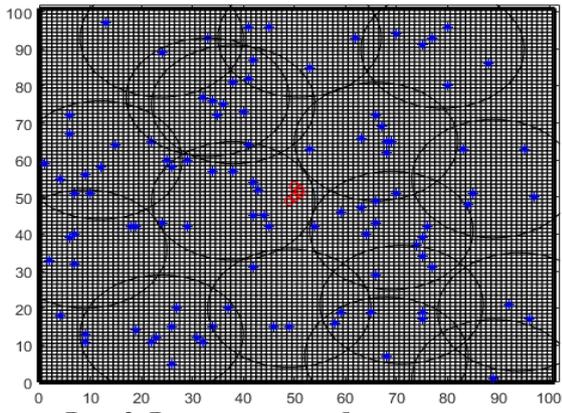


Рис. 2. Результаты разбиения множества объектов поиска на кластеры радиусом  $R_0$ .  
 Fig. 2. Results of splitting the sets of objects of search into clusters with radius  $R_0$ .

Fig. 3. The results of the operation of the automaton according to PC1 in clusters and PC1 within a cluster.

Однако реализация стратегии поиска не по минимальной дальности, а по максимальному учету важности объекта позволило получить совершенно другой результат (рис. 5).

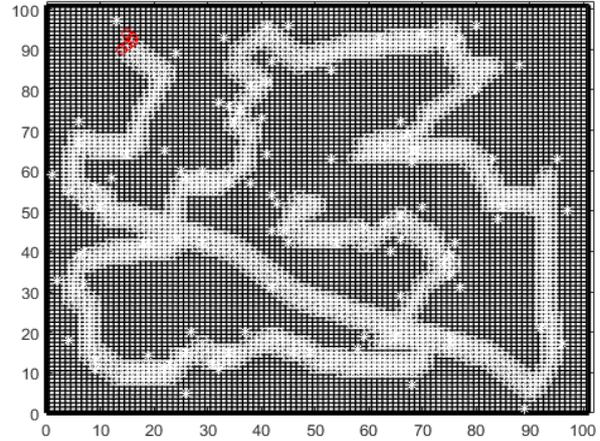


Рис. 4. Результаты работа автомата по стратегии ПЦ1.

Fig. 4. The results of the operation of the automaton according to the strategy PTs1.

Таблица 1.

Координаты кластеров.

Cluster coordinates.

Координаты Coordinates	Номер кластера Cluster number					
	1	2	3	...	16	17
х	12	9	24	...	89	94
у	60	36	13	...	1	19

Table 1.

Для реализации такого поведения автомату потребовалось 550 шагов, что формально делает его более эффективным, но показывает схожесть результатов.

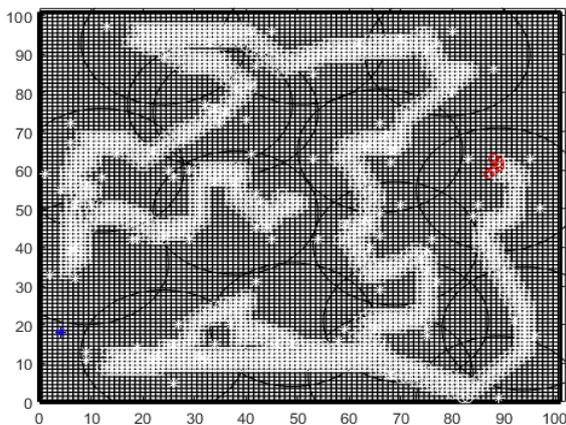
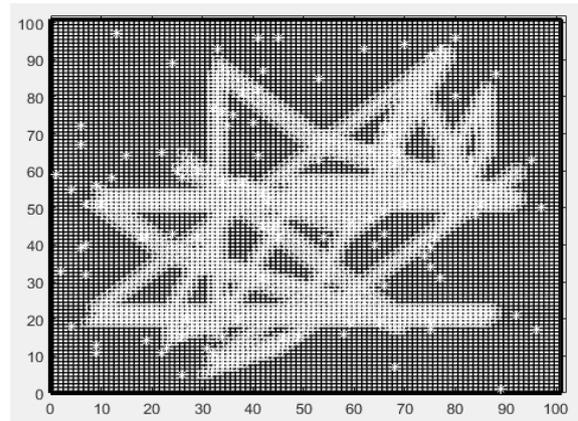
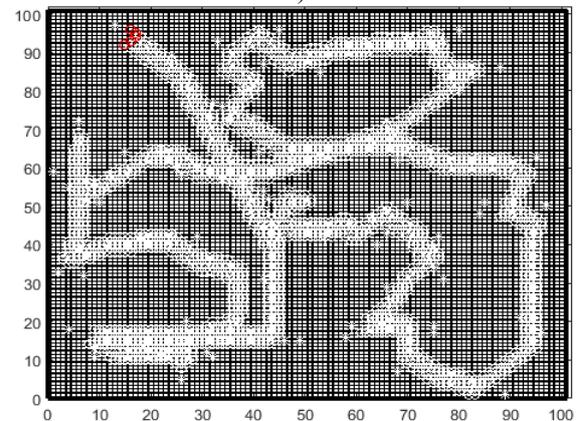


Рис. 3. Результаты работа автомата по ПЦ1 по кластерам и ПЦ1 внутри кластера.



а)



б)

Рис. 5. Результаты работы клеточного автомата при реализации стратегии «поиска наиболее важного объекта». а – без разбиения на кластеры, б – при

разбиении на кластеры.

**Fig. 5. The results of the cellular automaton in the implementation of the strategy of "search for the most important object."**

**a – without splitting into clusters, b – with splitting into clusters.**

Анализ полученных результатов показал, что работа автомата без учета кластеров была остановлена на 1786 шаге, а работа автомата с теми же условиями, но при разбиении на кластеры потребовала для своего завершения 575 шагов работы автомата. Это показало, что предложенный подход может быть эффективно использован в определенных условиях и при реализации сложных моделей поведения.

В ходе экспериментов неоднократно возникал вопрос о влиянии начального расположения автоматов группы поиска на результаты работы. Такое влияние было проверено в ходе группы экспериментов, результаты которых представлены на рис. 6.

Проведенные исследования работы группы автоматов показали, что автоматы заканчивали свою работу за 527 – 545 шагов. Т.е. можно сделать вывод о том, что эффективность работы автомата не зависит от начального положения группы поиска и больше зависит от расположения объектов поиска и их характеристик.

Следующим закономерным вопросом стал вопрос об использовании нескольких групп поиска.

Для этого были использованы автоматы ПЦІ по кластерам и ПЦІ по целям внутри кластеров.

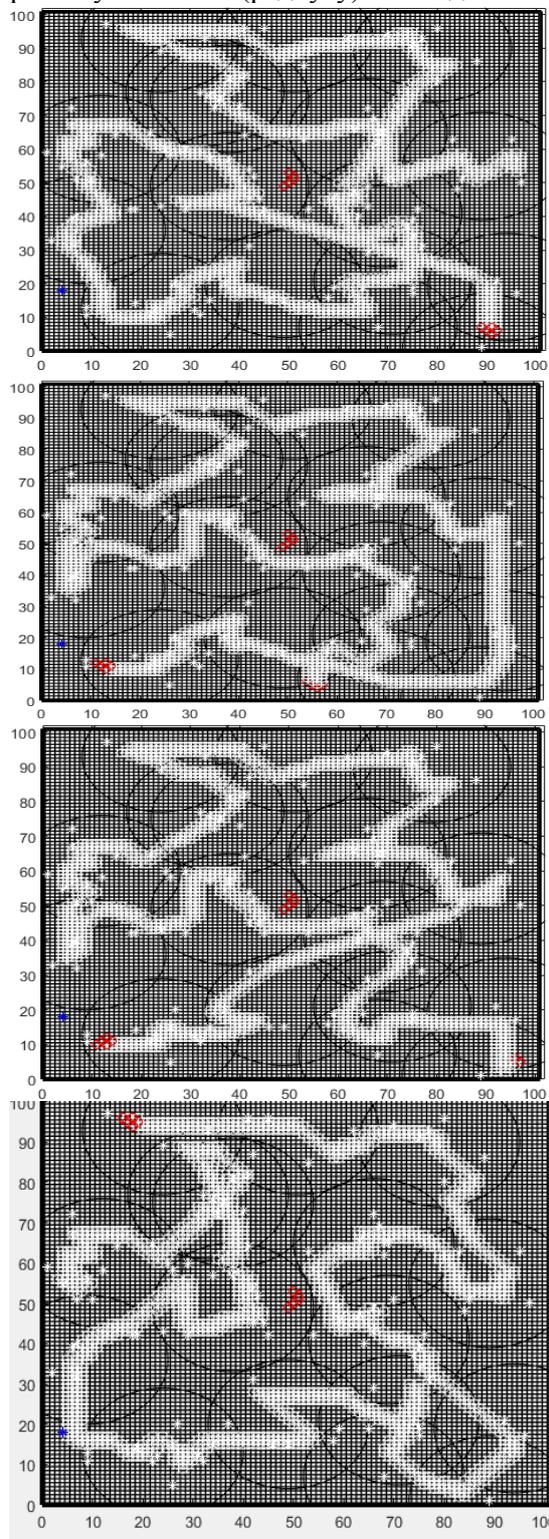
Такие эксперименты были проведены и получены следующие результаты, представленные на рис. 7.

На рисунке 7 приведены начальные положения групп поиска и результаты их работы по обходу всех объектов-целей.

Анализ результатов показал, что данные реализации заканчивали свою работу за 283 и 276 шагов работы. Что подтверждает идею о двукратном увеличении производительности. Однако исследования и моделирование показали, что необходима реализация механизма контроля объединения групп поиска, что может происходить достаточно часто, что требует реализации характеристик автономии и независимости, что потребовало некоторой коррекции поведения автоматом, что несущественно влияет на его работу.

Полученные результаты позволяют не

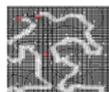
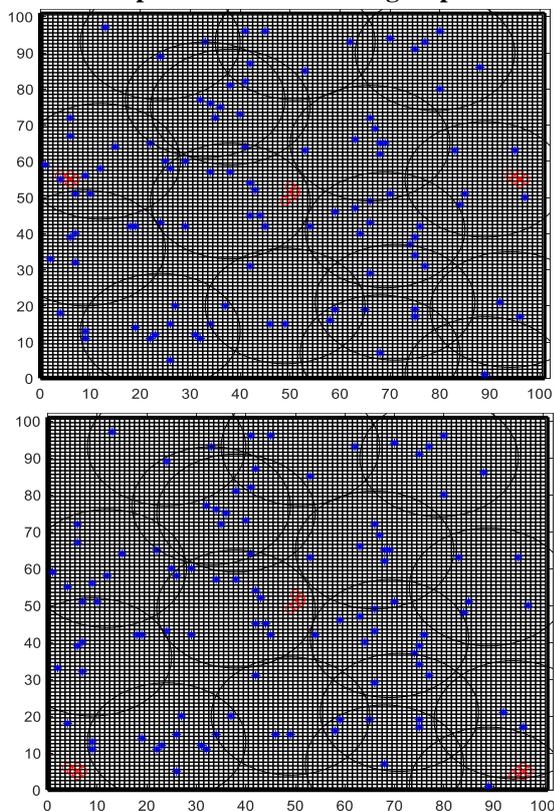
только решать задачу поиска маршрутов, но и решать задачу обоснования состава и количества групп поиска, а также позволяет проследить зависимость результативности поиска от возможностей групп поиска по реализуемой зоне (радиусу) наблюдения.



**Рис. 6. Зависимость результата работы клеточного автомата при реализации стратегии ПЦІ для кластеров и клеток внутри**

кластера в зависимости от начального положения группы поиска.

**Fig. 6. Dependence of the result of the operation of a cellular automaton when implementing the PC1 strategy for clusters and cells within a cluster, depending on the initial position of the search group.**



**Рис. 7. Начальное положение автоматов и результаты их работы в случае использования 2 групп поиска.**

**Fig. 7. The initial position of the automata and the results of their work in the case of using 2 search groups.**

В следствии реализации всех задуманных действий встала задача реализации стратегии мониторинг зоны ответственности.

Под мониторингом буде понимать поддержание осведомленности об объектах наблюдения.

Под осведомленностью понимается значение функции  $f(M)$ , учитывающей значение важности объектов наблюдения  $m_k$  :

$$f(M) = \sum_{k=1}^K m_k ;$$

Тогда ставится задача разработки клеточного автомата для максимизации значения функции  $f(M)$ .

Анализ задачи показывает, что необходимо учитывать не только значение расстояния до цели, но такую характеристику целей как  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ .

Анализ стратегий поведения клеточного автомата позволяет выделить стратегию ПЦЗ, которая в своей работе учитывает 2 характеристики объекта-цели.

Проведенный эксперимент позволил получить следующие значения.

Было использовано поле 50x50, 50 целей. Значение функции  $f(M)$  на начальном этапе составило  $f(M) = 2500$ , значения

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$  на этапе инициализации автомата задавались случайным образом в интервале  $[1, 1000]$ . Меньшему значению  $m_k$  соответствовала меньшая степень осведомленности. Задачей автомата была необходимость поддержания уровня

осведомленности о состоянии объекта на максимально возможном уровне.

Результаты работы автомата представлены на рис. 8.

Автомату удается поддерживать уровень осведомленности на уровне  $f(M)=2000$ , что является очень неплохим результатом и превзошёл ожидания авторов.

### ВЫВОДЫ

Таким образом проведенные исследования показали эффективность использования клеточных автоматов для решения задач поиска маршрутов при поиске целей в различных условиях.

Так же полученные результаты показали независимость результатов и эффективности работы клеточного автомата от начальных условий. Работа и эффективность работы зависит исключительно от характеристик объектов поиска и влияния внешней среды.

Предложенный подход к реализации клеточных автоматов позволит создать эффективную систему мониторинга за состоянием объектов наблюдения, что позволит минимизировать количество и состав групп мониторинга.

Полученные результаты позволяют сформулировать огромное количество задач для дальнейшего исследования и перейти к их

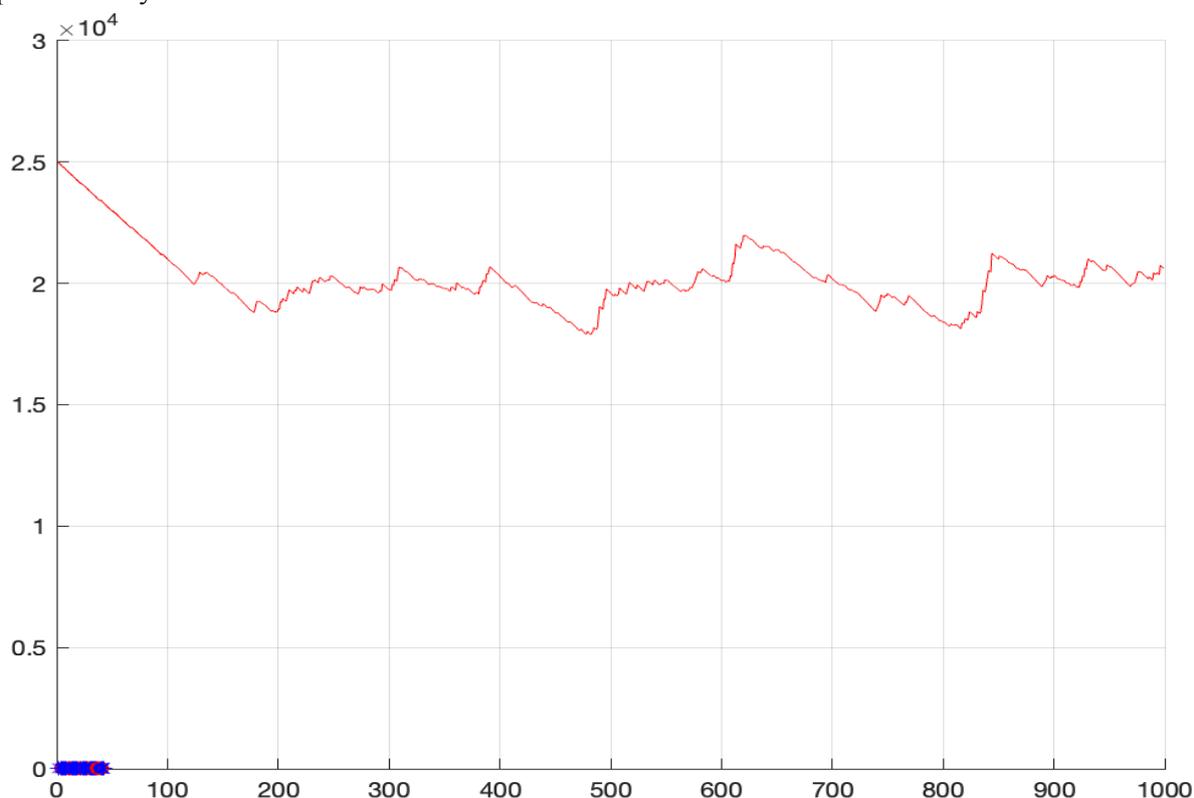


Рис. 8. Работа автомата по поддержанию уровня осведомленности  $f(M)$  об объектах наблюдения.

Fig. 8. The operation of the automata for maintaining the level of awareness  $f(M)$  of the objects of observation.

Хорошей идеей по повышению эффективности работы клеточного автомата является кластеризация целей поиска и обхода целей в кластере. Это позволяет сократить количество шагов поиска.

Использование предложенного аппарата позволяет так же решать задачи подбора характеристик групп поиска, их численного состава и количества групп поиска для решения каждой конкретной задачи.

реализации.

### Литература (References)

- [1] Madridano Á., Al-Kaff A., Martín D. 3D Trajectory Planning Method for UAVs Swarm in Building Emergencies. Sensors. 2020. Vol. 20(3), p. 642.
- [2] Gupta, N.A. Literature Survey on Artificial Intelligence. 2017. Available online:

- <https://www.ijert.org/research/a-literature-survey-on-artificial-intelligence-IJERTCONV5IS19015.pdf> (accessed on 15 December 2020).
- [3] Luo W., Tang Q., Fu C., Eberhard P. Deep-Sarsa Based Multi-UAV Path Planning and Obstacle Avoidance in a Dynamic Environment. In International Conference on Sensing and Imaging. 2018. pp. 102-111.
- [4] Hussain K., Salleh M. N. M., Cheng S., Shi Y. Metaheuristic Research: a Comprehensive Survey. Artificial Intelligence Review, 2019. No 52(4), pp. 2191-2233.
- [5] Malik H., Iqbal A., Joshi P., Agrawal S., Bakhsh F. I. Metaheuristic and Evolutionary Computation: Algorithms and Applications. Springer Nature Singapore. 2021. P.820.
- [6] Faramarzi A., Heidarinejad M., Mirjalili S., Gandomi A. H. Marine Predators Algorithm: A Nature-Inspired Metaheuristic. Expert Systems with Applications, 2020. Vol. 152.
- [7] Abualigah L. Group Search Optimizer: a Nature-Inspired Meta-Heuristic Optimization Algorithm with its Results, Variants, and Applications. Neural Comput & Applic 2021. No 33, pp. 2949–2972.
- [8] Dhiman G., Kaur A. Spotted Hyena Optimizer for Solving Engineering Design Problems 2017 International Conference on Machine Learning and Data Science (MLDS), 2017, pp. 114-119.
- [9] Nagel K., Schreckenberg M. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. Journal de physique I, 1992, Vol. 2(12), pp. 2221-2229.
- [10] Wolfram S. Cellular automaton fluids 1: Basic Theory. Journal of Statistical Physics, 1986, Vol. 45(3), pp. 471-526.
- [11] Mordvintsev A., Randazzo E., Niklasson E., Levin M. Growing Neural Cellular Automata. Distill, 2020, Vol. 5(2).
- [12] Pavlenko M.A., Rudenko V.M., Zaharchenko I.V., Zinchenko A.O., Chistov V.I. Metod Doslidzhennya Povedinki Grup Ruhomih Ob'ektiv z Viktoristannyam Klitinnih Avtomativ. Sistemi Szbroennya i Vijskova Tekhnika. 2021. № 3(67). P. 98-104. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.13>.
- [13] Semwal V. B., Gaud N., Nandi G. C. (2019). Human Gait State Prediction Using Cellular Automata and Classification Using ELM. In Machine Intelligence and Signal Analysis, 2019. pp. 135-145.
- [14] Kuznecov A. V. Uproshchennaya Model boevyh dejstvij na osnove kletchnogo avtomata. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya, 2017. № (3). P.59-71.
- [15] Pozhidaev M. S. Algoritmy Resheniya Zadachi Marshrutizatsii Transporta : Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk: spec. 05.13.18 [Elektronnyj Resurs] / Mihail Serge- evich Pozhidaev. — Tomsk, 2010. — Rezhim Dostupa: <http://www.marigostra.ru/materials/disser.html>.
- [16] Slastnikov S.A. Primenenie Metaevristicheskikh Algoritmov dlya Zadachi Marshrutizatsii Transporta / S.A. Slastnikov // Ekonomika i Matematicheskie Metody. — 2014. — T. 50. — Vyp. 1. — P.117-126.
- [17] Chapman C. S., Gallivan J. P., Wood D. K., Milne J. L., Culham J. C., Goodale M. A. Reaching for the Unknown: Multiple Target Encoding and Real-Time Decision-Making in a Rapid Reach Task. Cognition, 2010, vol. 116(2), pp. 168-176. Doi: 10.1016/j.cognition.2010.04.008
- [18] Bjarnadottir A. S. Solving the Vehicle Routing Problem with Genetic Algorithms / Aslaug Soley Bjarnadottir. — Technical University of Denmark, 2004. — 127 p.
- [19] Li, Yang, et al. A Review of Cellular Automata Models for Crowd Evacuation. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 526 (2019): 120752.
- [20] Toffoli, Tommaso, and Norman H. Margolus. Invertible Cellular Automata: a Review." Physica D: Nonlinear Phenomena 45.1-3 (1990): 229-253.
- [21] Codd, Edgar F. Cellular Automata. Academic Press, 2014.
- [22] Wu, Xinxin, et al. Simulating Mixed Land-Use Change under Multi-Label Concept by Integrating a Convolutional Neural Network and Cellular Automata: A Case Study of Huizhou, China. GIScience & Remote Sensing 59.1 (2022): 609-632.
- [23] Marzoug, R., et al. Modeling and Simulation of Car Accidents at a Signalized Intersection Using Cellular Automata. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 589 (2022): 126599.
- [24] Ji, Yanping, et al. "Real Time Building Evacuation Modeling with an Improved Cellular Automata Method and Corresponding IoT System Implementation." Buildings 12.6 (2022): 718.
- [25] Freedman, Michael, Jeongwan Haah, and Matthew B. Hastings. The group structure of Quantum Cellular Automata. Communications in Mathematical Physics 389.3 (2022): 1277-1302.
- [26] Khare, Ishaan, Harikumar Kandath, and K. Madhava Krishna. Predictive Optimal Collision Avoidance for a Swarm of Fixed-Wing Aircraft in 3D Space." 2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE, 2022.
- [27] Wu, Xinxin, et al. Simulating Mixed Land-Use Change under Multi-Label Concept by Integrating a Convolutional Neural Network and Cellular Automata: A Case Study of Huizhou, China." GIScience & Remote Sensing 59.1 (2022): 609-632.

[28] Ji, Yanping, et al. Real Time Building Evacuation Modeling with an Improved Cellular Automata Method and Corresponding IoT System Implementation. Buildings 12.6 (2022): 718.

[29] Małeckı, Krzysztof, Marek Kamiński, and Jarosław Waś. A Multi-Cell Cellular Automata Model of Traffic Flow with Emergency Vehicles:

Effect of a Corridor of Life and Drivers' Behaviour. Journal of Computational Science 61 (2022): 101628.

[30] Yangsheng, Jiang, et al. Cellular Automata Model of Mixed Traffic Flow Composed of Intelligent Connected Vehicles' Platoon. Journal of System Simulation 34.5 (2022): 1025.

**Сведения об авторах.**



**Захарченко Ирина Викторовна**, кандидат технических наук, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, область научных интересов искусственный интеллект, БПЛА

E-mail: [irishka310379@gmail.com](mailto:irishka310379@gmail.com)



**Чистов Валерий Игоревич**, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, область научных интересов искусственный интеллект, БПЛА, СППР

E-mail: [valera.chistov43@gmail.com](mailto:valera.chistov43@gmail.com)



**Павленко Владислава Максимовна**, студентка, Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, область научных интересов математическое моделирование Каразина. E-mail:

[marnidor@gmail.com](mailto:marnidor@gmail.com)



**Бердник Полина Геннадиевна**, кандидат технических наук, Харьковский национальный университета им. В.Н. Каразина, область научных интересов математическое моделирование

E-mail: [bpgpma@gmail.com](mailto:bpgpma@gmail.com)



**Павленко Максим Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, область научных интересов математическое моделирование,

E-mail: [bpgpma@ukr.net](mailto:bpgpma@ukr.net)



**Тимочко Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Харьковский национальный университет Воздушных сил, область научных интересов СППР, решение

многокритериальных оптимизационных задач

E-mail: [timochko.alex@gmail.com](mailto:timochko.alex@gmail.com)



**Крыжевская Екатерина Владимировна**, кандидат педагогических наук, доцент, Летная академия Национального авиационного университета, область научных интересов СППР

[kasenska01@yahoo.com](mailto:kasenska01@yahoo.com)