

## Modeling of Object Monitoring Using 3D Cellular Automata

**Zakharchenko I., Tristan A., Chornogor N., Berdnik P., Kalashnyk G., Timochko A., Zalevskii A., Dmitriiev O.**

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

**Abstract.** The purpose of this work is to develop a formal model for describing the properties of the environment for the functioning of unmanned aerial vehicles and to increase the speed of calculating the trajectory of their flight when monitoring critical infrastructure objects based on the mathematical apparatus of 3D cellular automata. This goal is achieved by solving the following problems: developing a method for describing the operating environment of unmanned aerial vehicles based on 3D cellular automata, developing a method for calculating the flight path of unmanned aerial vehicles. The construction of formal models is based on the apparatus of 3D cellular automata. The most significant results are a formalized description of the space, properties of zones and objects that restrict movement, as well as the development of a method for modeling the flight of an unmanned aerial vehicle in space when solving the monitoring problem, which will increase the speed of calculating the flight path. The significance of the results obtained lies in solving the complex problem of calculating the trajectory of movement of unmanned aerial vehicles for monitoring critical infrastructure objects using the apparatus of 3D cellular automata. The conducted studies have shown the effectiveness of using 3D - cellular automata to solve the problems of finding flight paths when monitoring critical infrastructure objects in various conditions. The proposed approach to the implementation of cellular automata will allow creating an effective monitoring system.

**Keywords:** monitoring system, UAV, power system, cellular automaton, optimization, clustering.

**DOI:** <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.4-56.06>

**UDC:** 621.311: 004.584

### Modeling object monitoring using 3d cellular automata

**Zakharchenko I., Tristan A., Chornogor N., Berdnik P., Kalashnyk G., Timochko A., Zalevskii A., Dmitriiev O.**

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

**Abstract.** The purpose of this work is to develop a formal model for describing the properties of the environment for the functioning of unmanned aerial vehicles and to increase the speed of calculating the trajectory of their flight when monitoring critical infrastructure objects based on the mathematical apparatus of 3D cellular automata. This goal is achieved by solving the following problems: developing a method for describing the operating environment of unmanned aerial vehicles based on 3D cellular automata, developing a method for calculating the flight path of unmanned aerial vehicles. The construction of formal models is based on the apparatus of 3D cellular automata. The most significant results are a formalized description of the space, properties of zones and objects that restrict movement, as well as the development of a method for modeling the flight of an unmanned aerial vehicle in space when solving the monitoring problem, which will increase the speed of calculating the flight path. The significance of the results obtained lies in solving the complex problem of calculating the trajectory of movement of unmanned aerial vehicles for monitoring critical infrastructure objects using the apparatus of 3D cellular automata. The conducted studies have shown the effectiveness of using 3D - cellular automata to solve the problems of finding flight paths when monitoring critical infrastructure objects in various conditions. The proposed approach to the implementation of cellular automata will allow creating an effective monitoring system.

**Keywords:** monitoring system, UAV, power system, cellular automaton, optimization, clustering.

© Захарченко И.В., Тристан А.В.  
Чорногор Н.А., Бердник П.Г.,  
Калашник А.А., Тимочко А.И.,  
Залевский А.В., Дмитриев О.Н. 2022

**Моделирование мониторинга объектов с помощью 3D-клеточных автоматов**  
**Захарченко И.В., Тристан А.В., Черногор Н.А., Бердник П.Г., Калашник А.А., Тимочко А.И.,**  
**Залевский А.В., Дмитриев О.Н.**

Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба  
Харьков, Украина

**Аннотация.** Целью данной работы является разработка формальной модели для описания свойств среды функционирования беспилотных летательных аппаратов и повышение скорости расчета траектории их полета в процессе мониторинга объектов критической инфраструктуры на основе математического аппарата 3D-клеточных автоматов. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач: разработки способа описания среды функционирования беспилотных летательных аппаратов на основе математического аппарата 3D-клеточных автоматов, разработки метода расчета траектории полета беспилотных летательных аппаратов с учетом имеющихся ограничений, а также разработки метода поиска траектории полета беспилотного летательного аппарата. В основу построения формальных моделей положен аппарат клеточных автоматов, который позволяет описать трехмерную модель среды функционирования, зоны и объекты, затrudняющие или ограничивающие перемещение, описать поведенческие модели и учесть существующие природные механизмы решения подобных задач. Наиболее существенными результатами являются формализованное описание пространства, свойств зон и объектов, ограничивающих перемещение, а также разработка метода моделирования полета беспилотного летательного аппарата в пространстве при решении задачи мониторинга, что позволит повысить скорость расчета траектории полета в сложных условиях решения задачи мониторинга объектов. Значимость полученных результатов состоит в решении сложной задачи расчета траектории передвижения беспилотных летательных аппаратов для мониторинга объектов критической инфраструктуры в трехмерном пространстве с использованием аппарата 3D клеточных автоматов, а также практическом исследовании свойств и возможностей разработанного математического аппарата. Проведенные исследования показали эффективность использования 3D - клеточных автоматов для решения задач поиска траекторий полета при мониторинге объектов критической инфраструктуры в различных условиях. Предложенный подход к реализации клеточных автоматов позволит создать эффективную систему мониторинга за состоянием объектов наблюдения, что позволит минимизировать количество и состав групп мониторинга и повысить эффективность их использования.

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

## ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг объектов критической инфраструктуры, в том числе энергетических, является важной практической и научной задачей. Особенно острой данная проблема становится при необходимости оперативного реагирования и ликвидации последствий аварии или чрезвычайной ситуации. Для организации мониторинга используют различные подходы. Эффективность оперативного реагирования во многом зависит от наличия и качества постоянных источников оперативной информации. Таковыми, как правило, являются подвижные группы наблюдения за объектами, например, беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Так, БПЛА достаточно широко применяются для осмотра линий электропередач [1], поиска мест аварий, разливов нефтепродуктов и др. [28]. Обычно беспилотными летательными аппаратами управляет человек-оператор. Однако такой

подход не всегда оправдан в силу временных или экономических ограничений.

Для повышения объемов и качества решаемых задач мониторинга перспективным считается использование автономных мониторинговых БПЛА либо таких, команды которым передаются эпизодически. При этом, однако, усложняется процесс планирования применения таких систем.

Поэтому необходима разработка новых методов планирования использования беспилотных летательных аппаратов. При расчете маршрута полёта требуется учесть размеры аппарата, особенности рельефа местности, растительность, препятствия в виде линий электропередач, столбов, вышек, башен, объектов промышленной и гражданской застройки, атмосферные явления и др.

Для успешного решения задач данного класса часто используются трехмерные геоинформационные системы, описывающие особенности области пространства, в котором осуществляется мониторинг. Но, в связи с

этим остро встает вопрос о том, какими способами решать задачи планирования движения беспилотных летательных аппаратов в трехмерном пространстве. Применение традиционных методов планирования маршрута полета не позволяет учесть всего многообразия встречающихся препятствий, их характеристик и влияния на прокладку траектории.

Максимальная эффективность использования возможностей БПЛА при ограниченности его ресурсов достигается тщательным планированием программы полета. В этой связи актуальной является задача поиска оптимальной (рациональной) траектории полета летательного аппарата с учетом особенностей его конструкции и характеристик бортового оборудования, условий полета и решаемых задач.

Рассмотрим существующие подходы к решению подобных задач.

#### *Анализ литературы*

Методы поиска различных объектов реализованы в программных продуктах, широко применяемых в военной сфере, мониторинге земельных участков, спасательных и поисковых операциях и т. п.

Вопросу построения маршрута движения с целью поиска объектов с определенными характеристиками посвящены работы [1 - 4]. Большинство методов нахождения движущихся объектов или построения маршрутов движения построены с использованием традиционных алгоритмов поиска на графах, Венгерского метода, поиска в глубину, нейронных сетей или их комбинаций.

Процесс планирования маршрутов движения БПЛА в городских условиях описан в [5]. Определение оптимального маршрута движения для типичных ситуаций осуществляется алгоритмом A-star, для нетипичных – Венгерским методом.

Планирование маршрутов облета беспилотными летательными аппаратами стационарных объектов посвящена работа [6]. Разработанный метод позволяет получить оценку важности объектов для их поиска (подтверждения).

Разработке алгоритма планирования маршрута движения, направленного на нахождение маршрута с обходом помех, на основе использования искусственной нейронной сети посвящена статья [7].

Данный алгоритм основан на комбинации методов поиска в глубину (поиск на графе) и алгоритме обучения с подкреплением. Такой подход требует значительных временных и вычислительных ресурсов для своей реализации.

Учитывая особенности оптимизационной задачи подобной сложности, целесообразно использование метаэвристических методов, построенных на принципах имитации поведения объектов живой природы. Достоинства и недочеты метаэвристических методов построения маршрутов рассмотрены в трудах [8], [9].

Работа [10] посвящена рассмотрению метаэвристического алгоритма поиска, основанный на принципах поведения животных, поиск стратегии достижения цели осуществляется путем определения максимумов/минимумов целевой функции.

Разработанный в работе [11] алгоритм 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 простоте и гибкости. Принципы построения и моделирования клеточных автоматов рассмотрены в работах [12], [13]. Ряд работ [14]–[18] доказывает эффективность использования клеточных автоматов для поиска стратегий поведения клеточных автоматов, объектов и моделирования внешней среды.

Работа [19] описывает стратегию поиска движущихся объектов с использованием клеточного автомата, основанную на правилах поведения групп объектов живой природы. В работе описана однородная клеточная решетка с установленными границами, отражающая 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.

Поведение интеллектуальных агентов при выполнении задач в движения представлено в работе [21]. Использование клеточного автомата позволило реализовать как поведение агентов, так и учесть

необходимость изменения стратегии их поведения.

В статье [22] на основе клеточных автоматов описано моделирование поведения толпы с учетом ментальных особенностей пешеходов.

В работе [25] описан клеточно-автоматный подход к моделированию поведения транспорта и пешеходов.

Поиск оптимальных маршрутов движения с использованием аппарата клеточных автоматов представлен в статье [26]. Однако в данной работе рассмотрено движение только отдельных однородных объектов в двумерном пространстве. Но этого явно недостаточно для решения задачи построения маршрута в трехмерном пространстве. В этом случае требуется учесть особенности заданного района поиска и, соответственно, доработать представленную модель.

Целесообразность применения клеточно-автоматного подхода к решению задачи коммивояжера рассмотрена в работе [27].

Задача поиска маршрутов движения автомобилей от оптовых баз к торговым точкам на основе клеточных автоматов успешно решена в работе [28]. Однако такой подход применим только при наличии дорожной сети и сформулированной задачи коммивояжера для данных условий. Задача построения маршрута движения летательных аппаратов в такой постановке решена быть не может.

Особенно детально остановимся на рассмотрении работы, которая была приведена в одном из последних номеров данного журнала (автор Захарченко И.В.). В данной работе предложено использование клеточного автомата и решается задача поиска маршрута полета группы БПЛА для мониторинга объектов критической инфраструктуры. В основу работы данного автомата положена идея метаэвристического поиска решений на основе моделирования поведения косяка рыбы при поиске добычи. Модель показала хорошие результаты работы при двумерном варианте реализации. Однако данная модель ориентирована исключительно на «случайный» вариант поиска цели, связанного с условной близостью расположение и слабой зависимостью от важности и значимости объекта.

Реализация только двумерного варианта снижает описательные возможности внешней среды и позволяют получить упрощенные

модели возможных реализаций решений. Перенос такой модели в трехмерное пространство лишь снизит скорость решения задачи и снизит качество получаемых решений из-за больших вычислительных затрат на ее реализацию и повышении неопределенности в процессе получения результатов.

Сравнение такого подхода с другими реализациями клеточных автоматов [12 - 25] показывает, что они реализовывались лишь для двумерных случаев либо упрощались до двумерного случая. Такой подход связан с хорошо разработанной теорией таких автоматов и относительной простотой реализации. В свою очередь это вносит ограничение на степень детализации описания внешней среды и огрубляет полученные результаты. Также значительно менее развиты способы формального описания и задания клеточных автоматов в трехмерном пространстве, что требует совершенствования математических методов их описания и исследования их эффективности, что осталось за рамками известных работ. Хотя существующие методы позволяют расширить их для трехмерных клеточных автоматов, однако на практике таких реализаций практически не приводится. Существенной проблемой является кратный рост пространства поиска решений и возможных реализаций стратегии поведения клеточного автомата. Это, в свою очередь, повышает степень описательных возможностей и реализации сложных стратегий поведения клеточных автоматов [26 - 30].

Анализ литературы показал, что исследования моделей среды поведения беспилотных летательных аппаратов и планирования их использования на базе клеточных автоматов не завершены. Актуальным является планирование маршрута полета БПЛА с учетом известных ограничений в трехмерном пространстве, разработка математической модели решения данной задачи с использованием клеточных автоматов и ее исследование.

## МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения задачи поиска маршрута полета БПЛА в трехмерном пространстве при поиске целей рассмотрим особенности решаемой задачи, ограничения и допущения,

приняты в данной работе.

Под траекторией летательного аппарата будем понимать линию в пространстве, являющуюся множеством геометрических точек, где можно найти летательный аппарат, в любой момент времени.

Задание траектории  $\vec{r} \rightarrow \vec{r}(t)$  подразумевает задание изменений трёх декартовых координат во времени:

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k},$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орты.

Такой общий подход не дает ответа на вопрос: как именно проложить траекторию и учесть имеющиеся ограничения?

Под ограничениями для данной задачи будем понимать, в первую очередь, зоны, невозможные для пролета. Для малых БПЛА такими зонами будут: рельеф местности, массивные объекты промышленного и гражданского строительства, башни, вышки, линии электропередач, зоны, запрещенные для полета и др. Учет этих ограничений, существенным образом, скажется на размерности задачи и способе ее решения.

В традиционных методах практически отсутствуют ограничения на размер пространства решения задачи. Обычно задаются лишь технические характеристики БПЛА. Однако такие ограничения не всегда применимы при решении задачи в ограниченном пространстве, например, в помещении или определенной зоне.

Отмеченные особенности постановки задачи о нахождении траектории полета БПЛА требуют разработки новых математических методов ее решения. Они должны быть адаптивными к сложности постановки и учитывать определенное число факторов влияния.

На наш взгляд, проведенный анализ показал, что математический аппарат клеточных автоматов наиболее полно соответствует заданным требованиям.

Однако существующие клеточные автоматы чаще всего «заточены» на решение задачи в двумерном пространстве и ограниченно учитывают препятствия. Под «препятствием» чаще всего понимаются «непреодолимые» стенки, что не всегда соответствует физической реальности.

В качестве базовой модели клеточного автомата воспользуемся предложенной в [20]

моделью решётчатого газа, дополненной и усовершенствованной для трехмерного случая.

Зададим и опишем такой клеточный автомат.

Клеточный автомат можно определить как множество конечных клеточных автоматов в трехмерном пространстве с координатами  $(i, j, n)$ , которые могут находиться в одном из возможных состояний  $S$  [7, 8, 11, 13]:

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

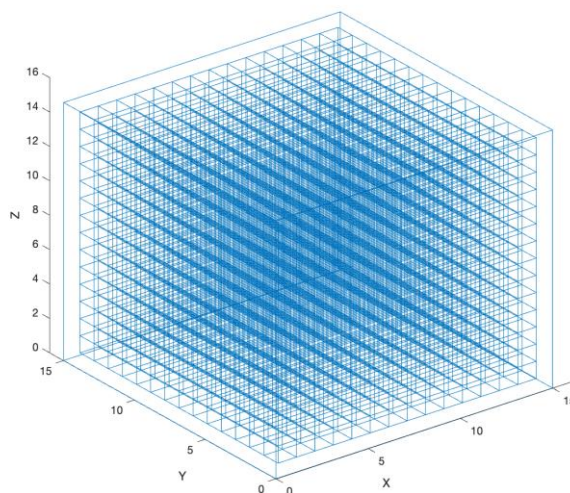
Каждый шаг работы автомата будет характеризоваться сменой его состояния по определенным правилам:

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

где  $N(i, j, n)$  – пространство вокруг автомата  $(i, j, n)$ .

В работе окружение автомата будем представлять, как окружение по Муру [20], но расширенное для трехмерного случая:

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

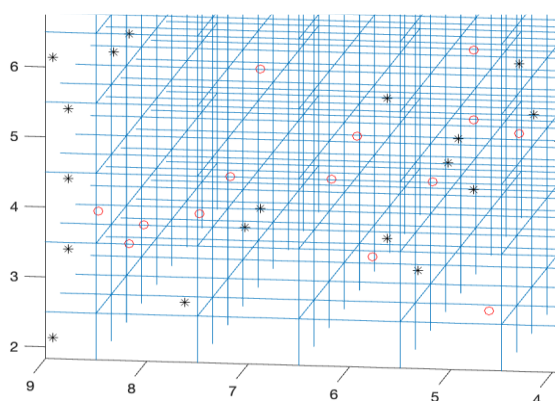


**Рис. 1. Трехмерная однородная решетка для исследований работы клеточного автомата.**  
**Fig. 1. Three-dimensional homogeneous lattice for studying the operation of a cellular automaton.**

Выражения (1) и (2) позволяют задать однородную трехмерную решетку (рис. 1).

Для упрощения расчетов такую решетку обычно свертывают в сферу. То есть "нижний" край решетки состыковывается с "верхним", а "левый" край – с "правым" [8]. Однако для более точного описания реальной

среды функционирования беспилотных летательных аппаратов будет использована ограниченная решетка с границами (рис. 2).



**Рис. 2. Типы клеточных автоматов (\* – объекты интереса, о – летательные аппараты).**  
**Fig. 2. Types of cellular automata (\*– objects of interest, o – UAV).**

Согласно правилам разработки клеточного автомата, для задачи поиска используем автоматы двух типов: объекты поиска и поисковый БПЛА (рис. 1 и 2).

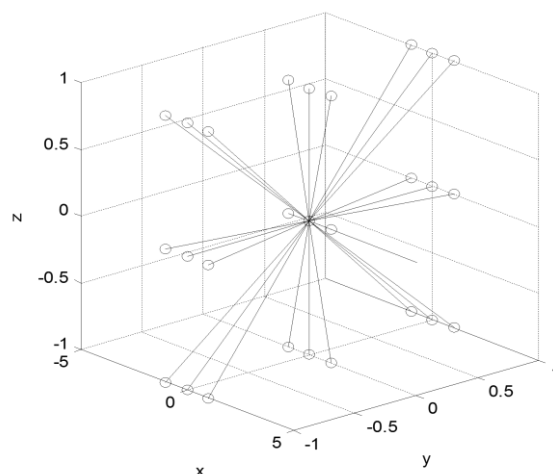
На рис.2 и в дальнейшем знаком **О** красного цвета будем обозначать летательные аппараты, знаком \* – объекты поиска, знаком **О** зеленого цвета – препятствия.

Для клеточного автомата на плоскости существует 8 возможных вариантов перемещения [\*], а для трехмерного случая – 26 вариантов, что существенно влияет на способы и время получения решений. Все 26 вариантов перемещения можно применить только в беспилотных летательных аппаратах вертолетного или квадрокоптерного типа. В БПЛА самолетного типа возможна реализация меньшего количества вариантов перемещения из-за физических ограничений и особенностей полета данного аппарата.

Согласно предложенной модели [20], решетчатая структура является устойчивой и однородной, в которой каждый узел решетки описывается как БПЛА; непреодолимое препятствие; зона с различными способами ее преодоления; цель (объект интереса). Такое представление позволит описать реальные объекты в пространстве, задав их пространственные характеристики.

Рассмотрим формальное представление данной модели. Решение о выборе возможных направлений движения производится путем подсчета

соответствующих вероятностей (рис. 3).



**Рис. 3. – Графическое отображение понятия "возможные направления движения".**  
**Fig. 3. – Graphic representation of the concept of "possible directions of movement".**

Выбор направления движения в момент времени  $t_1$  не зависит от предыдущего состояния в момент времени  $t_0$ . Движение клетки в одном из 26 возможных направлений является случайным и задается следующими правилами расчета вероятности:

$$P_i(x, y, z) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D(x, y, z+k), i = \overline{1, 26}; \quad (4)$$

где  $(x, y, z)$  – текущие координаты БПЛА;

$N$  – глубина анализа окружения клетки;

$k$  – коэффициент глубины анализа;

$D(x, y, z)$  - состояние клетки:

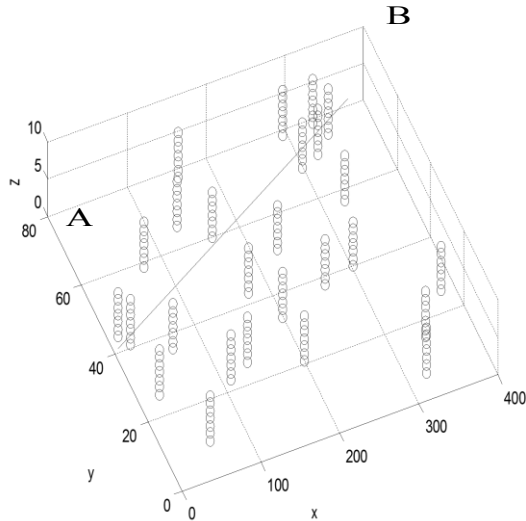
$$D(x, y, z) = \begin{cases} 1, & \text{клетка занята;} \\ 0, & \text{клетка свободна.} \end{cases}$$

Реализуем механизм, регулирующий направление движения клетки от текущего положения в заданное. Для этого воспользуемся теорией векторов.

Прежде всего, найдем вектор от текущего положения клетки к целевому объекту  $\overline{AB}$  (рис. 4).

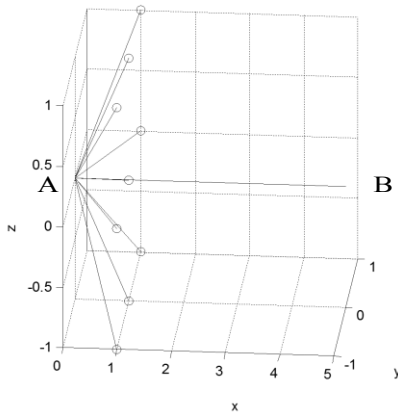
Далее построим векторы из текущей ячейки ко всем 26 возможным для перемещения ячейкам. В общем виде векторы описываются выражением (5):

$$\overline{f}_j(x; y; z) = x \in \{-1, 0, 1\}, y \in \{-1, 0, 1\}, z \in \{-1, 0, 1\}, j = \overline{1, 26}. \quad (5)$$



**Рис 4. Вектор от БПЛА к объекту.**  
**Fig. 4. Vector from the UAV to the object.**

Соответствующие направления определяются комбинациями значений составляющих (рис. 5):



**Рис.5. – Представление вектора  $\overline{AB}$  и орт-векторов.**

**Fig. 5. – Representation of vector  $\overline{AB}$  and ortho-vectors.**

После этого находим углы между вектором  $\overline{AB}$  и всеми орт-векторами, согласно выражению

$$a_j = \arccos \left( \frac{\overline{AB} \cdot \overline{f_j}}{|\overline{AB}| |\overline{f_j}|} \right). \quad (6)$$

Далее решаем оптимизационную задачу:

$$D_j(x, y, z) = D_0(x, y, z) + \overline{f_j}, \quad (7)$$

при условиях:

$$\max(P_i), \quad (8)$$

$$\min(\alpha_j). \quad (9)$$

Если какие-либо значения  $P$  или  $\alpha$  равны, то выбор производится случайным образом.

Однако подобная модель имеет недостатки: низкая различимость вероятностей выбора направления, зависание автомата на одном месте, значительные отклонения от основного направления движения и т. д.

Для преодоления этих недостатков было предложено при расчете вероятности использовать выражение:

$$P_i = e^{-\frac{\sum_{k=1}^N D(x+k, y, z)}{\delta}}, \quad (10)$$

где  $\delta$  – коэффициент регулирования чувствительности изменения вероятности при ее расчете.

В данной модели зададим движение БПЛА от точки старта по направлению на объект как целеполагание непреодолимой силы. Т. е. БПЛА стремится к объекту всегда и в любых условиях, огибая препятствия и находя «кратчайший» путь к объекту. В этом модель имитирует поведение животных в их стремлении, например, догнать добычу [12].

Опишем начальные условия и решим поставленную задачу рассмотрим с использованием предложенного математического аппарата.

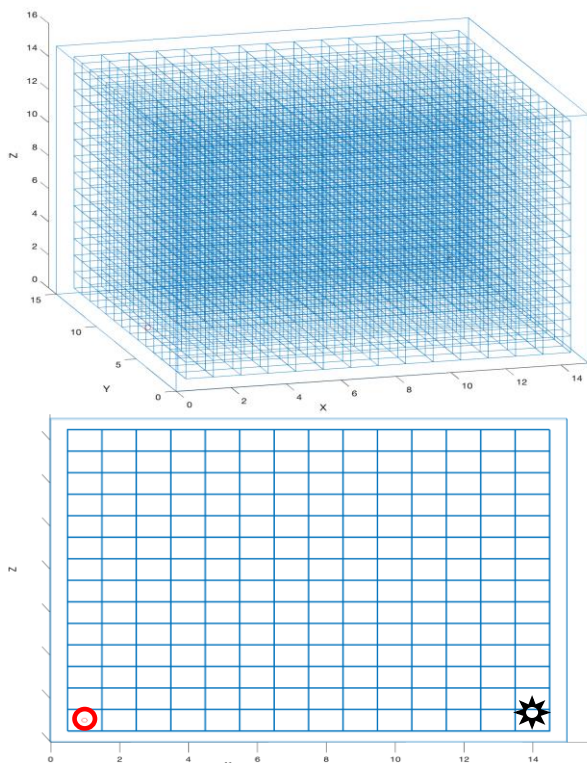
Пусть БПЛА находится на «земле» с координатами (1, 7, 1). Он должен подняться на заданную высоту и переместиться к объекту мониторинга, координаты которого известны.

Начальное положение клеточных автоматов объекта и цели поиска представлены на рис. 6.

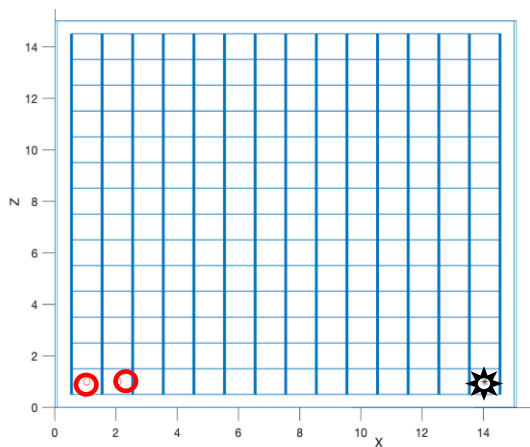
Рассмотрим движение клеточного автомата поиска в заданном направлении от точки «старта» к объекту. Назовем данную стратегию – свободный поиск.

Ограничения и допущения:

1. Цели всегда лежат «внизу» на плоскости XY.
2. Высота полета задана на уровне 8 единиц (по оси Z).

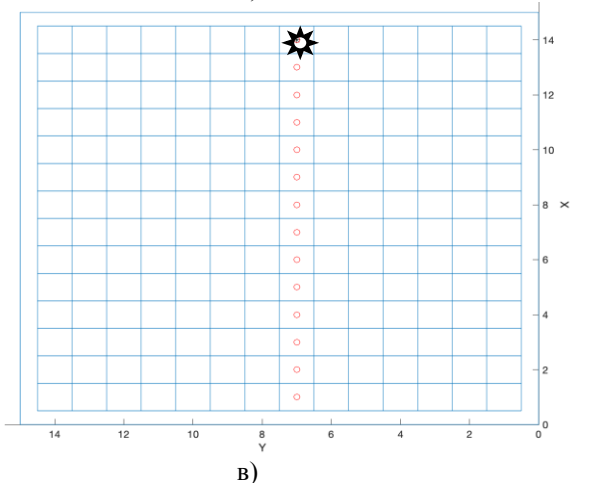
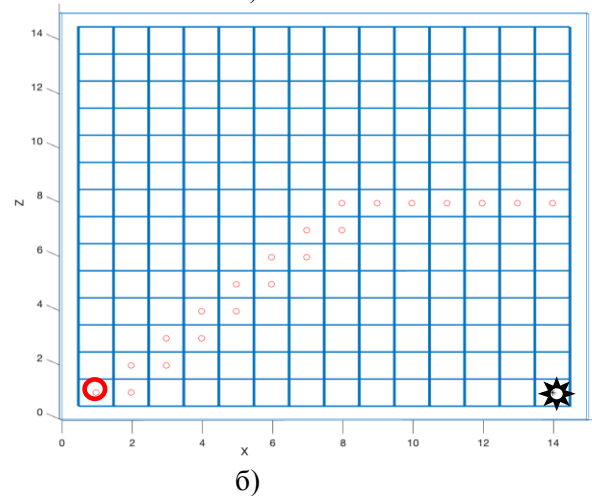
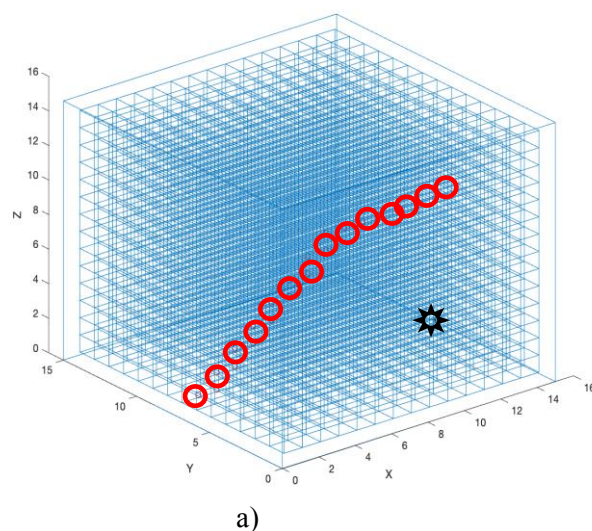


**Рис. 6. Начальное положение клетки-объекта и летательного аппарата.**  
**Fig. 6. Initial position of the cell-object and UAV.**



**Рис. 7. Положение клеточного автомата после 1 шага работы.**  
**Fig. 7. The position of the cellular automaton after 1 step of work.**

- Решение.
1. Находим вектор от БПЛА к цели.
  2. Ищем шаг изменения координат БПЛА.
  3. Пересчитываем координаты.
  4. Проверяем высоту и корректируем.
  5. Пересчитываем координаты.
  6. Если БПЛА находится над целью, то заканчиваем работу.



**Рис. 8. Поведение клеточного автомата при достижении цели и барражирования над ней.**  
**Fig. 8. Behavior of the cellular automaton when reaching the goal and loitering over it.**

Данное описание является правилами работы клеточного автомата.  
 Рассмотрим этапы работы клеточного автомата.



После 1-го шага работы автомата получим следующее положение целей и БПЛА (рис. 7).

Промежуточные итоги работы в виде 3D модели и проекции на плоскости представлены на рис. 8. Очевидно, что клеточный автомат за 25 шагов работы вышел на заданную высоту полёта и удержал положение чётко над целью. Данный тип поведения клеточного автомата очень ценен для оценки стратегии и правил поведения автомата без учёта воздействия внешних факторов на траекторию его движения.

Рассмотрим поведение автомата при наличии зон, запрещенных для пролета. Препятствия могут быть как естественного (рельеф, растения), так и искусственного происхождения (линии электропередач и др.).

Зададим препятствие в виде «стены» (рис. 9). В таком случае возможен пролет только «снизу» «стены».

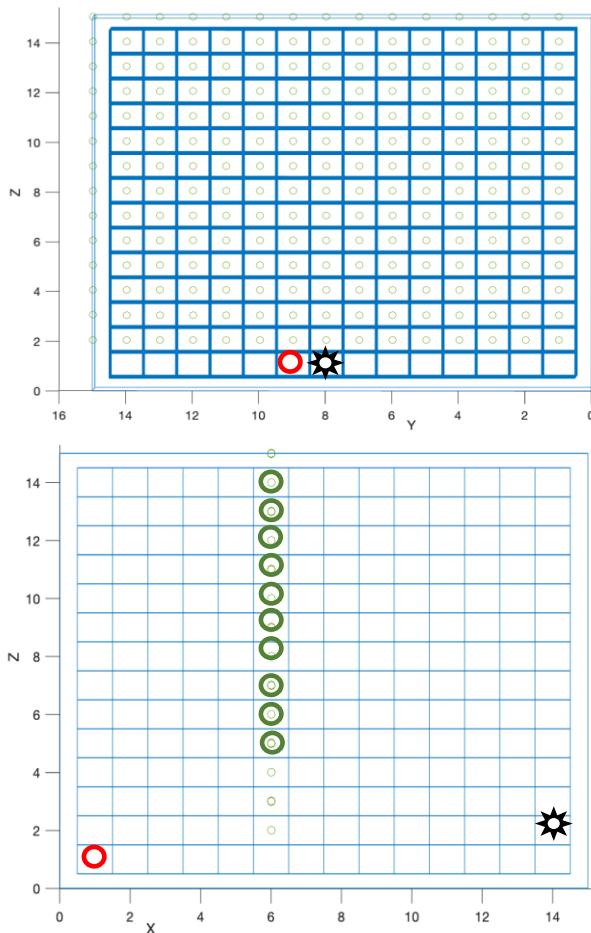


Рис. 9. Препятствие для пролета летательного аппарата в виде «стены».  
Fig. 9. An obstacle to the passage of an UAV in the form of a "wall".

Правила работы клеточного автомата в изменившихся условиях являются такими:

1. Находим вектор от БПЛА к цели.
2. Ищем шаг изменения координат БПЛА.
3. Если передвижение возможно, то пересчитываем координаты.
4. Если движение невозможно, то ищем вариант обхода.
5. Проверяем высоту и корректируем.
6. Пересчитываем координаты.
7. Если летательный аппарат находится над целью (в радиусе обзора), барражируем над объектом.
8. Барражируем заданное время и прекращаем работу клеточного автомата.

Изменения правил поведения клеточного автомата позволило не лететь напрямик через запрещенную зону, а облететь препятствие с той стороны, с которой возможно (рис. 10).

Решение было найдено за 37 шагов работы автомата. Это показывает, что автомат «перебирал» варианты и нашел решение из доступных.

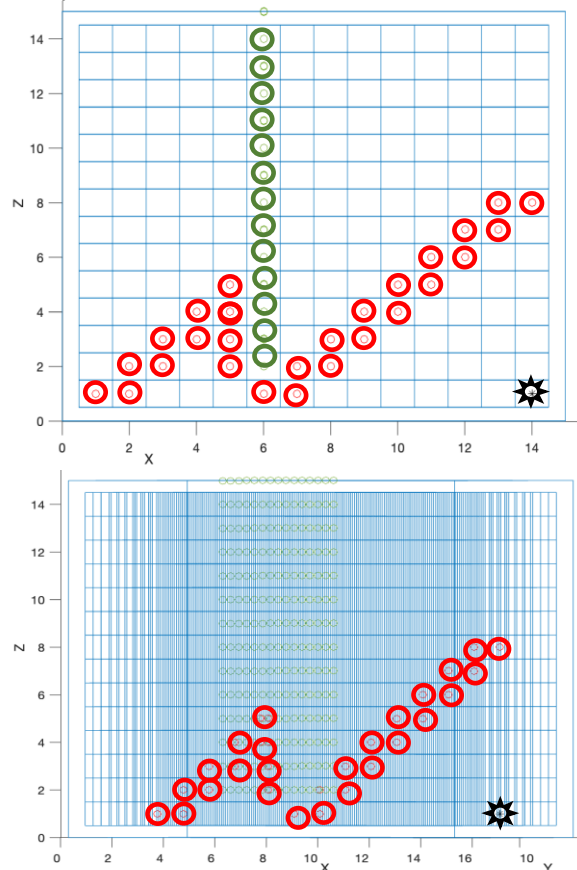
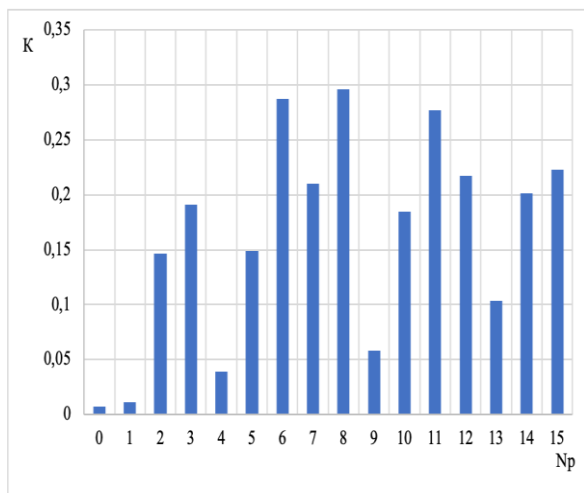


Рис. 10. Преодоление препятствий клеточным автоматом  
Fig. 10. Overcoming obstacles by a cellular automaton.



**Рис. 11. Результаты оценки эффективности работы клеточного автомата при различном количестве препятствий  $N_p$ .**

**Fig. 11. Results of evaluation of the efficiency of cellular automaton with a different number of obstacles  $N_p$ .**

Исследования разработанной модели позволили получить следующие результаты (рис. 11).

Для оценки эффективности работы автомата было предложено использование следующего выражения:

$$K = \frac{N_{av}}{N_o}, \quad (11)$$

где  $N_{av}$  – количество шагов работы автомата (фактически количество посещенных ячеек);

$N_o$  – общее число ячеек в модели;

$K$  – коэффициент эффективности работы автомата, чем меньше, тем лучше.

Как видно из рис. 11 эффективность работы клеточного автомата мало зависит от количества препятствий  $N_p$ . Как показали многочисленные эксперименты с моделью, основное влияние на эффективность его работы оказывают площадные размеры препятствия и их взаимное расположение. Полученные результаты показали высокую эффективность разработанной модели и способность решать задачу поиска траектории полета в сложных условиях за минимальное время. Время значительно зависит от типа используемого вычислительного устройства и среды реализации модели.

Полученные результаты позволяют разработать метод поиска траектории полета

беспилотного летательного аппарата в пространстве при решении задачи мониторинга объектов критической инфраструктуры с использованием клеточных автоматов (рис. 12).

Разработанный метод позволяет: синтезировать клеточные автоматы с заданными свойствами; учитывать характеристики БПЛА и внешней среды; формировать различные стратегии поведения; проводить всесторонние исследования таких автоматов; находить оптимальные варианты их использования.

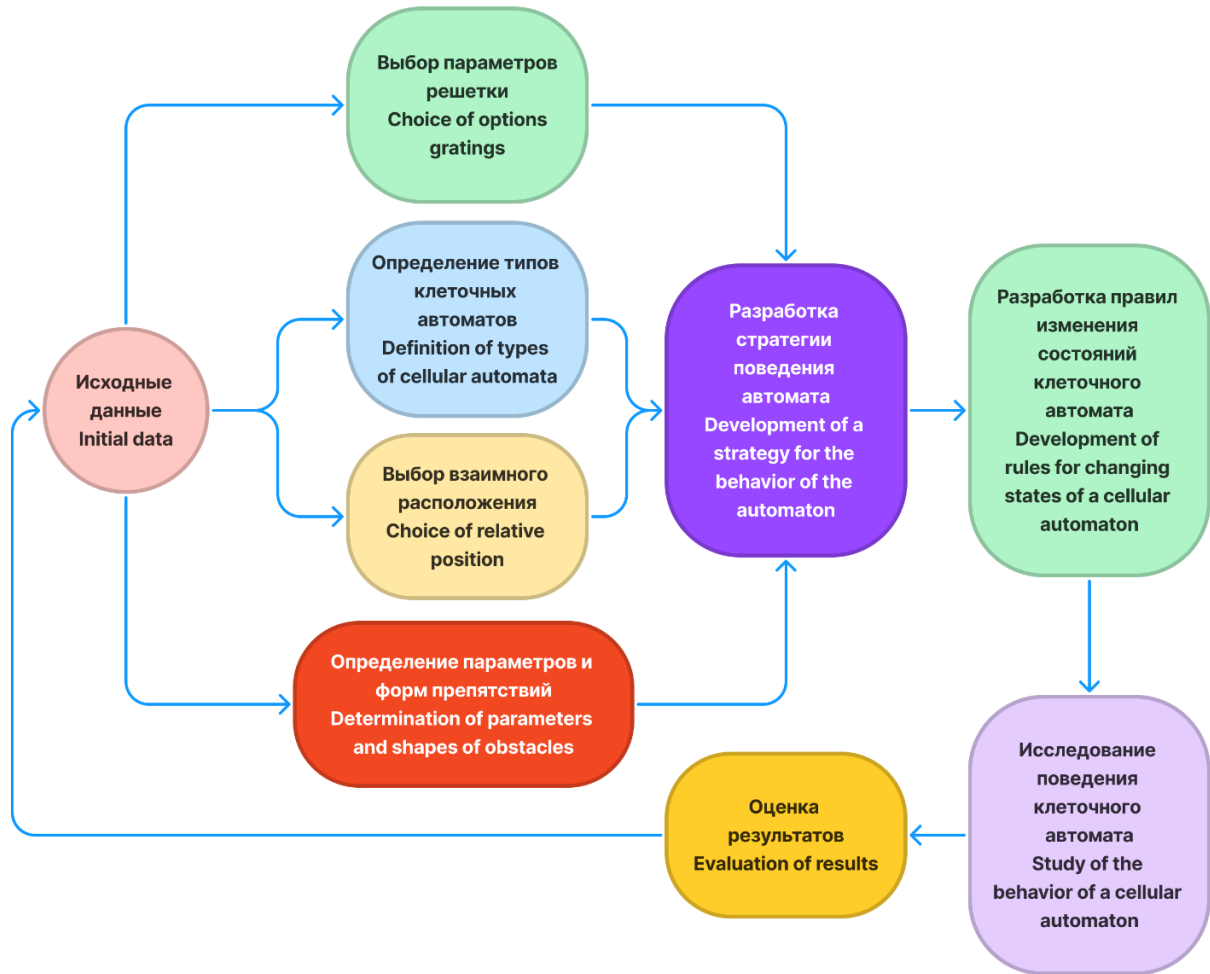
### ВЫВОДЫ

В данной работе основное внимание уделено решению задачи поиска траектории полета БПЛА при решении задачи мониторинга объектов критической инфраструктуры.

В работе предложен подход к формированию поведенческих стратегий клеточного автомата поиска. Это позволяет сформулировать стратегии, которые отражают особенности поведения и ограничения, характерные для каждого типа БПЛА. Также рассмотрен процесс адаптации стратегий поведения под особенности решаемой задачи и изменения условий выполнения задачи летательным аппаратом.

Разработанный метод поиска траектории полета беспилотного летательного аппарата при решении задачи поиска целей с использованием клеточных автоматов показал следующее. Реализация каждого конкретного этапа требует тщательного изучения условий выполнения задачи, обоснованного определения количества ячеек в клеточной решетке, оптимизации вычислительных процедур при обработке больших массивов данных, разработки эффективных механизмов управления памятью. Отдельного рассмотрения требуют вопросы формализации и способов хранения правил, которые описывают стратегии поведения автоматов поиска. От их реализации будет значительно зависеть вычислительная сложность разработанной модели.

Проведенные эксперимент показал высокие описательные и адаптивные способности разработанного клеточного



**Рис. 12. Структура метода поиска траектории полета беспилотного летательного аппарата в пространстве при решении задачи мониторинга объектов с использованием клеточных автоматов.**

**Fig. 12. The structure of the method of searching for the flight trajectory of an unmanned aerial vehicle in space when solving the task of object monitoring using cellular automata.**

автомата для решения задач мониторинга объектов критической инфраструктуры. Данный подход доказал возможность описания среды с различными условиями использования и адаптацию клеточного автомата к ее изменению.

Проведенные исследования показали, что возможным направлением дальнейшего совершенствования разработанного подхода может быть использование интеллектуального агента в качестве клеточного автомата поиска. То есть клеточный автомат поиска будет иметь дуальную природу. С одной стороны, он будет являться элементом клеточной модели описания среды и объектов этой среды, а с другой будет проявлять свойства самостоятельного интеллектуального агента. Такой подход позволит описать более сложные поведенческие стратегии,

усовершенствовать процесс взаимодействия со средой, а также создать оптимизированные процедуры описания и реализации действий автомата поиска в моделируемой среде.

#### 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] 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.
- [3] 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.
- [4] Malik H., Iqbal A., Joshi P., Agrawal S., Bakhsh

- F. I. Metaheuristic and Evolutionary Computation: Algorithms and Applications. Springer Nature Singapore. 2021. P.820.
- [5] Faramarzi A., Heidarinejad M., Mirjalili S., Gandomi A. H. Marine Predators Algorithm: A Nature-Inspired Metaheuristic. *Expert Systems with Applications*, 2020. Vol. 152.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Nagel K., Schreckenberg M. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. *Journal de physique I*, 1992, Vol. 2(12), pp. 2221-2229.
- [9] Wolfram S. Cellular automaton fluids 1: Basic Theory. *Journal of Statistical Physics*, 1986, Vol. 45(3), pp. 471-526.
- [10] Mordvintsev A., Randazzo E., Niklasson E., Levin M. Growing Neural Cellular Automata. *Distill*, 2020, Vol. 5(2).
- [11] Pavlenko M.A., Rudenko V.M., Zaharchenko I.V., Zinchenko A.O., Chistov V.I. Metod Doslidzhennya Povedinki Grup Ruhomih Ob'ektiv z Viktoristanniam Klitinnih Avtomativ. *Sistemi Ozbroyennya i Vijskova Tekhnika*. 2021. № 3(67). P.98-104. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.67.13>.
- [12] 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.
- [13] Kuznecov A. V. Uproshchennaya Model boevyh dejstvij na osnove kletchnogo avtomata. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2017. № (3). P.59-71.
- [14] Pozhidaev M. S. Algoritmy Resheniya Zadachi Marshrutizatsii Transporta : Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk: spec. 05.13.18 [Elektronnyj Resurs] / Mihail Sergeevich Pozhidaev. — Tomsk, 2010. — Rezhim Dostupa: <http://www.marigostra.ru/materials/disser.html>.
- [15] 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.
- [16] 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
- [17] Bjarnadottir A. S. Solving the Vehicle Routing Problem with Genetic Algorithms / Aslaug Soley Bjarnadottir. — Technical University of Denmark, 2004. — 127 p.
- [18] Li, Yang, et al. A Review of Cellular Automata Models for Crowd Evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 526 (2019): 120752.
- [19] Toffoli, Tommaso, and Norman H. Margolus. Invertible Cellular Automata: a Review." *Physica D: Nonlinear Phenomena* 45.1-3 (1990): 229-253.
- [20] Codd, Edgar F. *Cellular Automata*. Academic Press, 2014.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Freedman, Michael, Jeong wan Haah, and Matthew B. Hastings. The group structure of Quantum Cellular Automata. *Communications in Mathematical Physics* 389.3 (2022): 1277-1302.
- [25] D.S. Svyetlichnyy, Modelling of the microstructure: From classical cellular automata approach to the frontal one, *Computational Materials Science*, Volume 50, Issue 1, 2010, Pages 92-97, ISSN 0927-0256, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.07.011>.
- [26] H. Arata, Y. Takai, N. K. Takai and T. Yamamoto, "Free-form shape modeling by 3D cellular automata," *Proceedings Shape Modeling International '99*. International Conference on Shape Modeling and Applications, 1999, pp. 242-247, doi: 10.1109/SMA.1999.749346.
- [27] Dong Wook Shu, Sung Woo Park, and Junseok Kwon. 3d point cloud generative adversarial network based on tree structured graph convolutions. In *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, October 2019.
- [28] Edward J. Smith and David Meger. Improved adversarial systems for 3d object generation and reconstruction. volume 78 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pp. 87–96. PMLR, 13–15 Nov 2017. URL

<http://proceedings.mlr.press/v78/smith17a.html>.

[29] Jascha Sohl-Dickstein, Eric A. Weiss, Niru Maheswaranathan, and Surya Ganguli. Deep unsupervised learning using nonequilibrium thermodynamics. In Proceedings of the 32nd International Conference on International Conference on Machine Learning - Volume 37,

ICML'15, pp. 2256–2265. JMLR.org, 2015.

[30] Zhang, D., Choi, C., Kim, J., & Kim, Y. M. (2021). Learning to generate 3d shapes with generative cellular automata. arXiv preprint arXiv:2103.04130.

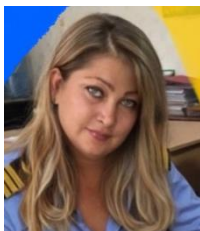
### Сведения об авторах.



**Захарченко Ирина Викторовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры, Харьковский национальный университет ВС, область научных интересов: искусственный интеллект, БПЛА  
E-mail: [irishka310379@gmail.com](mailto:irishka310379@gmail.com)



**Тристан Андрей Викторович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник Харьковский национальный университет ВС, область научных интересов: искусственный интеллект, БПЛА, СППР  
E-mail: [tristanA@gmail.com](mailto:tristanA@gmail.com)



**Чорногор Наталья Алексеевна**, кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры, Летная академия НАУ, область научных интересов: математическое моделирование. E-mail: [Chornogor1970@ukr.net](mailto:Chornogor1970@ukr.net)



**Бердник Полина Геннадиевна**, кандидат технических наук, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Область научных интересов: математическое моделирование  
E-mail: [bpgpma@gmail.com](mailto:bpgpma@gmail.com)



**Калашник Анна Анатольевна**, доктор геологических наук, профессор кафедры, Летная академия НАУ, область научных интересов: СППР.  
E-mail: [kalashnilga@ukr.net](mailto:kalashnilga@ukr.net)



**Тимочко Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Летная академия НАУ, область научных интересов: СППР, управление движением  
E-mail: [timochko.alex@gmail.com](mailto:timochko.alex@gmail.com)



**Залевский Анатолий Васильевич**, кандидат технических наук. Летная академия НАУ, область научных интересов: математическое моделирование  
E-mail: [Zalevskiy\\_av@ukr.net](mailto:Zalevskiy_av@ukr.net)



**Дмитриев Олег Николаевич**, доктор технических наук, профессор, декан факультета, Летная академия НАУ, Область научных интересов: СППР, БПЛА  
E-mail: [Dmitronik70@i.ua](mailto:Dmitronik70@i.ua)