

УДК 004.896

doi: 10.53816/20753608_2025_3_123

**РОЕВЫЕ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫХ ОБЪЕКТОВ:
ДВИЖЕНИЕ РОЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕПЯТСТВИЙ**

**ROLE-PLAYING SYSTEMS OF UNMANNED OBJECTS:
SWARM MOVEMENT IN THE PRESENCE OF OBSTACLES**

Чл.-корр. РАН А.Э. Соловьев, А.Н. Ивутин, М.Ю. Шишлов, Т.В. Молодцова

Тулский государственный университет

A.E. Soloviev, A.N. Ivutin, M.Yu. Shishlov, T.V. Molodtsova

Данная статья продолжает цикл работ, посвященных исследованиям в области движения многоагентных систем (роев). В статье приводятся визуализации различных вариантов движения роя, полученных на основе ранее разработанной математической модели. Показано, как рой, стремясь к предварительно заданной цели, самостоятельно, без дополнительных указаний извне преодолевает различные типы препятствий.

Ключевые слова: рой, агент, математическая модель, траектория движения, цель, препятствия, преодоление.

This article continues the cycle of works devoted to research in the field of motion of multi-agent systems (swarms). The article provides a visualization of various swarm movement options based on a previously developed mathematical model. It is shown how the swarm, striving for a predetermined goal, independently, without additional instructions from outside, overcomes various types of obstacles.

Keywords: swarm, agent, mathematical model, trajectory, goal, obstacles, overcoming.

Существуют разные подходы к описанию многоагентных систем [1, 2]. Наиболее распространенной моделью, описывающей в динамике групповые взаимодействия, является модель Вичека [3–5], которую можно разделить на свободную, когда агенты роя взаимодействуют только между собой, и направленную, когда агенты стремятся к заданной цели. При этом модель Вичека не позволяет учитывать наличие препятствий на пути движения роя. Используя разработанную систему моделирования многоагентных взаимодействий [6, 7] которая позволяет воспроизводить различные внешние условия и визуализировать процесс движения агентов роя, был визуализирован процесс движения агентов роя в соответствии с моделью Вичека, который представлен на рис. 1 и 2.

Как видно из рисунков, одним из ключевых недостатков модели Вичека является невозможность выдерживать заданное расстояние между агентами роя, а также между агентами роя и целью. Это приводит к тому, что свободный рой, в принципе, не достигает собранного состояния и полностью игнорирует цель (рис. 1, б). Направленный рой, в какой-то момент достигает состояния относительной собранности (рис. 2, б) но не может приблизиться к заданной цели. Более того, довольно быстро упорядоченная структура роя разрушается, что приводит (даже в отсутствии препятствий) к отрыву ряда агентов от основного роя (рис. 2, в).

Указанных недостатков модели Вичека лишена математическая модель движения роя,

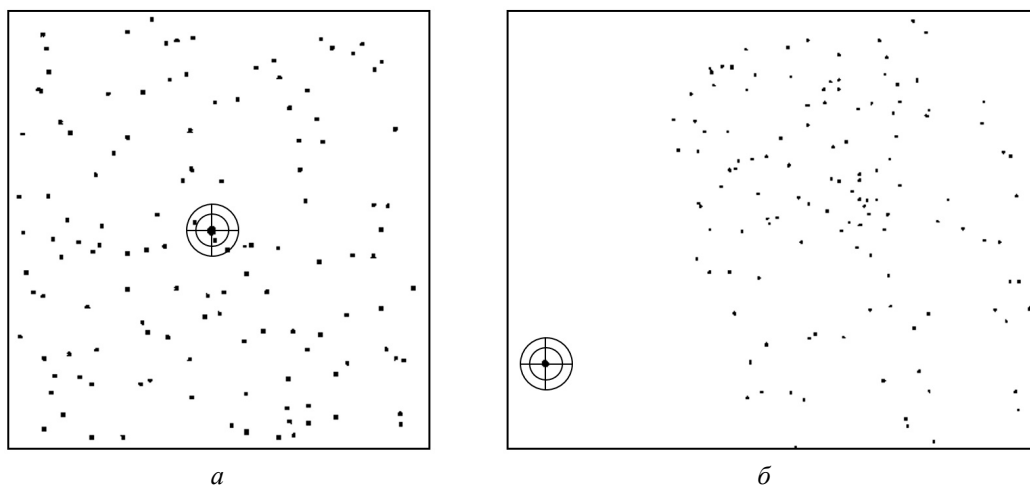


Рис. 1. Движение свободного роя Вичека:
а — исходное состояние; б — собранное состояние

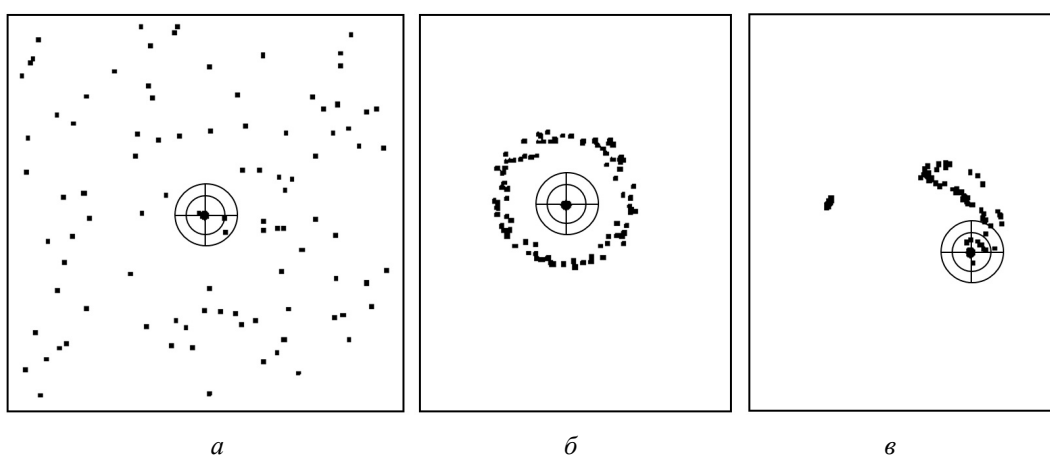


Рис. 2. Движение направленного роя Вичека:
а — исходное состояние; б — собранное состояние; в — конечное состояние

предложенная в предыдущей статье данного цикла [8]. Указанная модель описывает связи между агентами роя; вводит понятие препятствий, встречу с которыми агенты пытаются избежать; задает цель, к которой стремятся агенты роя, что позволяет при моделировании использовать элементы теории графов [9–11]. При этом управление роем сводится только к заданию цели, дальнейшее движение рой осуществляет самостоятельно, без дополнительных указаний извне.

На рис. 3 приведена раскладка движения роя, стремящегося к цели при отсутствии препятствий.

При этом, начиная с третьего кадра, имитируется постепенное уничтожение агентов роя (уничтоженные агенты показаны жирными звездочками), которое на приведенном рисунке

достигает 25 %. Однако, не смотря на потери, оставшиеся агенты роя достаточно равномерно распределяются относительно заданной цели. Как показало моделирование аналогичных ситуаций, стремление «окружить» цель и равномерно распределиться вокруг нее сохраняется даже у единичных агентов роя.

Особый интерес представляет движение роя, осложненное наличием препятствий. Причем, препятствия могут быть трех типов:

- точечные (если размер препятствия не превышает размеры агента роя) неподвижные;
- точечные подвижные (при этом считается, что скорость движения препятствий соизмерима со скоростью движения агентов роя);
- протяженные (длина которых существенно превышает размер агента роя).

Как показало моделирование, у роя не возникает проблем с обгибанием точечных неподвижных препятствий, вне зависимости от их количества. Достаточно большое количество таких препятствий, сосредоточенных в одном месте, могут замедлить продвижение роя к цели, отклонив его от кратчайшего пути (рис. 4). Это хорошо заметно начиная с четвертого кадра.

На рис. 5 приведена раскадровка поведения роя при его взаимодействии с точечными подвижными препятствиями. В данном случае цель отсутствует (что делает рой малоподвижным), а сквозь рой проходят подвижные препятствия (показаны жирными квадратами), которые двигаются из правого верхнего угла в левый нижний, и от контакта с которыми агенты роя долж-

ны уклониться. Отметим, что пропуская сквозь себя подвижные препятствия, рой сохраняет свою организацию. Успешность преодоления протяженных препятствий зависит не только от их формы, но и от их расположения относительно траектории движения роя. Отметим, что все протяженные препятствия имеют углы и выступы, значительно превышающие размер агентов роя, что существенно влияет на их движение.

На рис. 6 два препятствия расположены параллельно основной траектории движения роя, что приводит к отрыву от роя (потере) пяти агентов, на гранях препятствий, которые расположены поперек движения роя. Это обусловлено тем, что остальные агенты роя, обогнув препятствие и сосредоточившись в районе цели, перестали оказывать воздействие

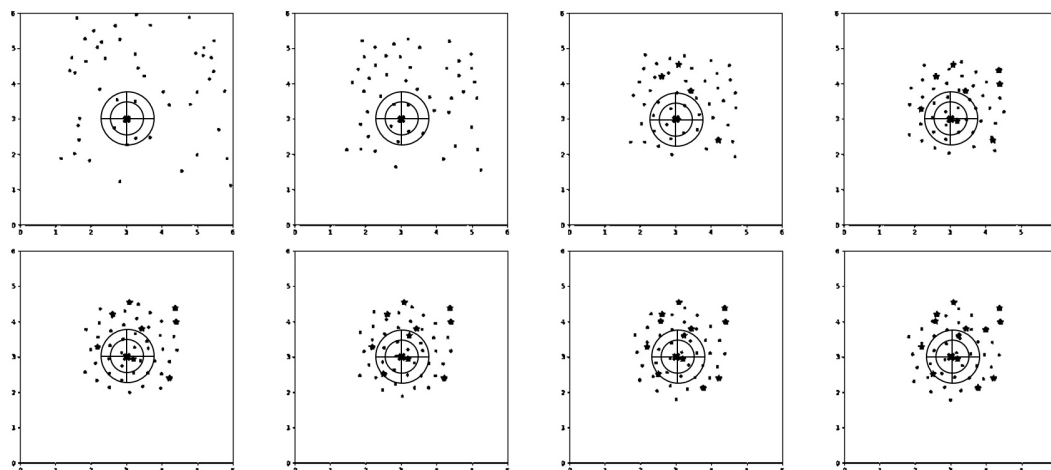


Рис. 3. Движения роя, стремящегося к цели при отсутствии препятствий

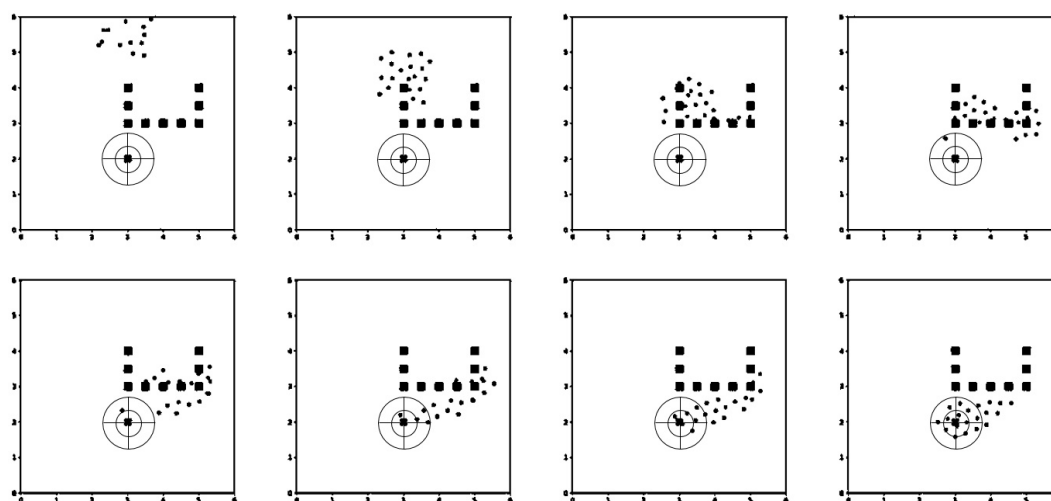


Рис. 4. Движения роя, при наличии точечных препятствий

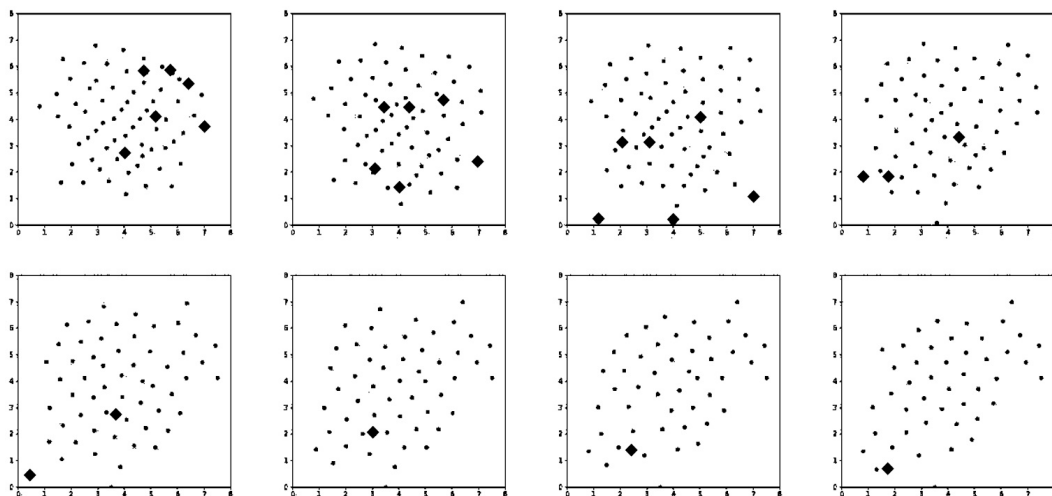


Рис. 5. Движения сквозь рой подвижных препятствий

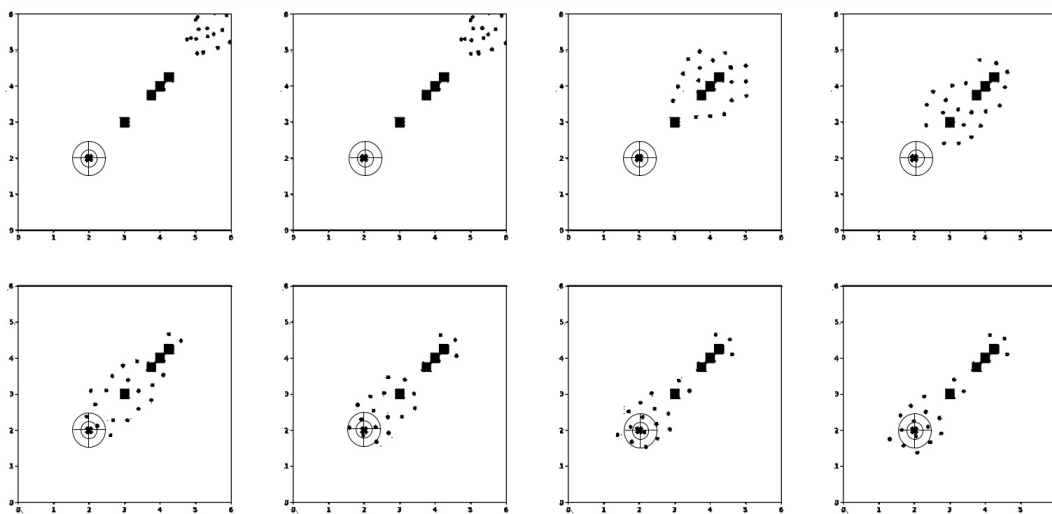


Рис. 6. Движения роя при двух неподвижных препятствиях

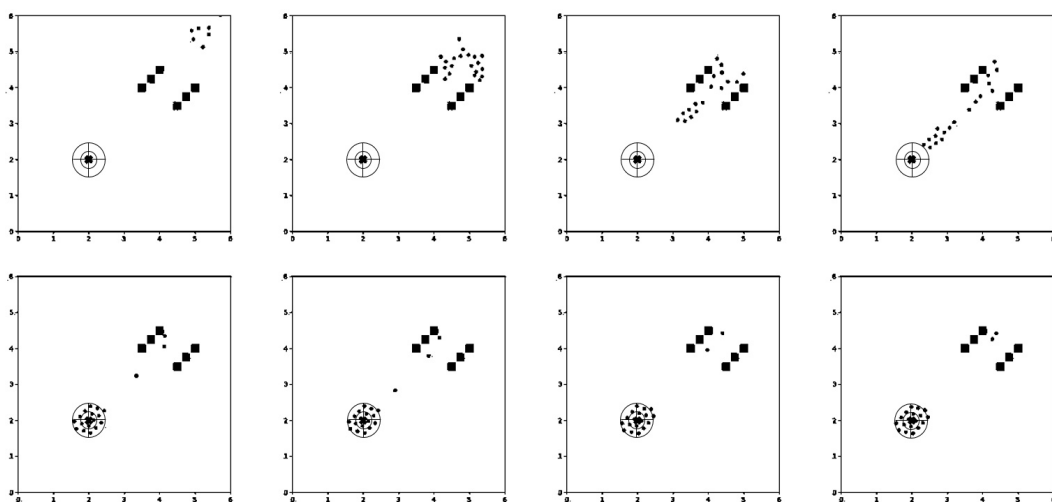


Рис. 7. Движения роя через препятствие типа «труба»

на отставших агентов в направлении, перпендикулярном оси препятствия.

На рис. 7 показано преодоление роем препятствия типа «труба». Здесь виден отрыв двух агентов, обусловленный их задержкой на гранях препятствия (четвертый кадр), что в итоге привело к отставанию от основной группы и выходу за радиус действия сил со стороны агентов этой группы.

На рис. 8 представлена раскадровка преодоления роем гладкого препятствия, расположенного под углом к траектории его движения. Из-за отсутствия граней, препятствующих движению роя вдоль препятствия, рой преодолевает его без потери агентов.

На рис. 9 представлена раскадровка преодоления роем препятствия, расположенного пер-

пендикулярно к траектории его движения. Учитывая, что препятствие имеет выступы, это одно из самых сложных препятствий для его преодоления роем. Тем не менее, агенты, достигшие препятствия первыми, заняли позиции между гранями препятствия, по сути «сгладив» его, что позволило продолжить движение к цели остальным агентам роя.

Как показало моделирование, самым сложным для преодоления оказывается препятствие типа «стакан», практически исключающее движение к цели попавших в него агентов (рис. 10).

Таким образом, предложенная математическая модель автономного движения роя к заранее заданной цели работоспособна и позволяет

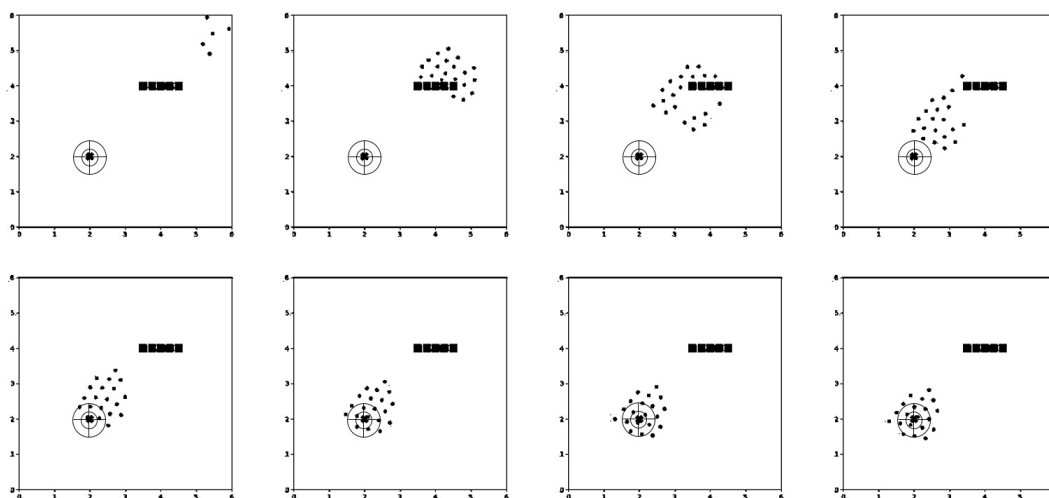


Рис. 8. Преодоления роем гладкого препятствия

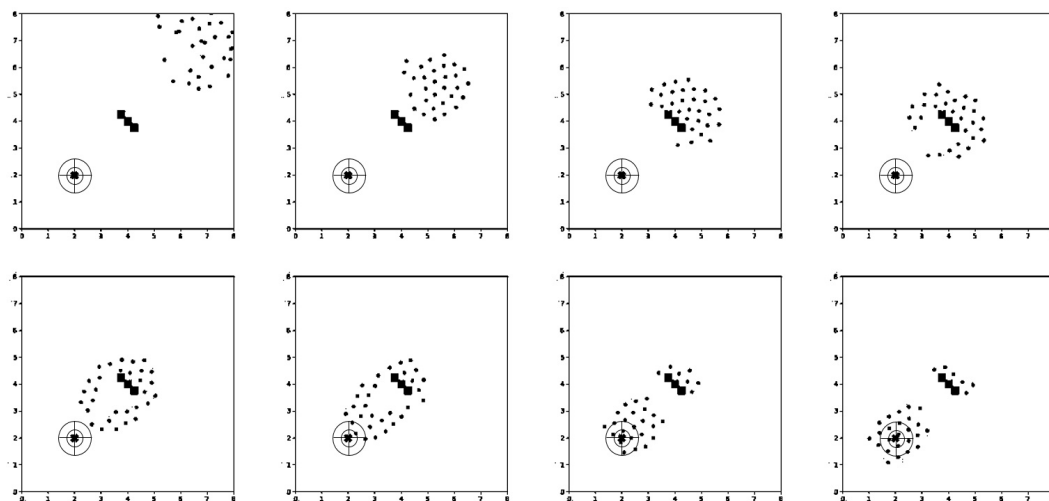


Рис. 9. Преодоление роем препятствия, расположенного перпендикулярно к траектории его движения

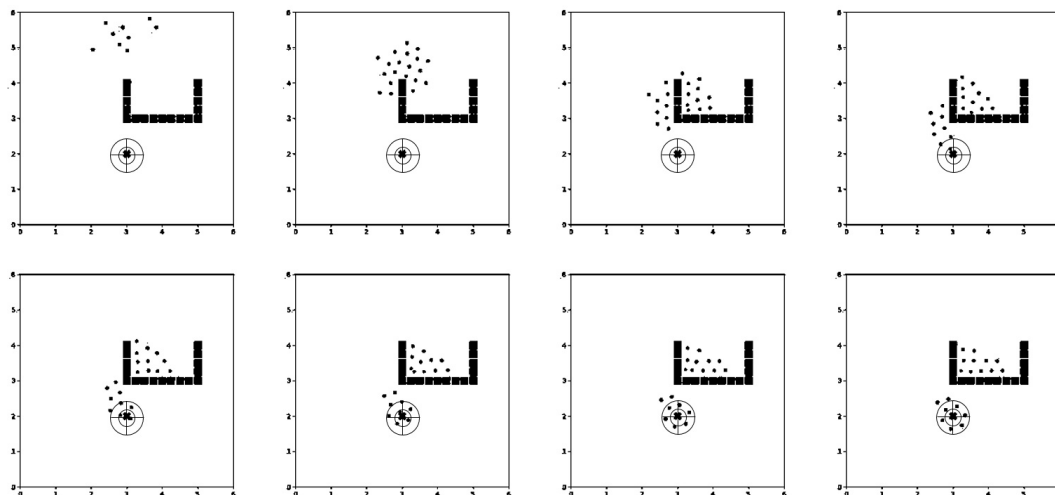


Рис. 10. Преодоление роем препятствия типа «стакан»

преодолевать различные типы препятствий без дополнительных команд. Однако, ряд препятствий приводит к отрыву части агентов от роя, что будет снижать эффективность его действия в районе цели. Поэтому в алгоритм движения агентов, желательно ввести модели поведения, позволяющие им менять направления своего движения и огибать препятствия, в случае если их скорость станет меньше определенной величины.

Список источников

1. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // *Nature*. 2000. Т. 407. N 6803. Pp. 487–490.
2. Toner J., Tu Y. Flocks. Herds and schools: A quantitative theory of flocking // *Physical review E*. 1998. V. 58. N 4. P. 4828.
3. Vicsek T. et al. Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles // *Physical Review Letters*. 1995. N 6 (75). Pp. 1226–1229.
4. Соловьев А.Э., Ивутин А.Н., Прохорцов А.В., Чукова О.В. Роевые системы беспилотных объектов: современное состояние и перспективы // *Известия Российской Академии ракетных и артиллерийских наук*. № 4 (134). 2024. С. 65–70.
5. Соловьев А.Э., Ивутин А.Н., Прохорцов А.В., Чукова О.В. Роевые системы беспилотников: битва алгоритмов — биология vs физика // *Защита и безопасность*. 2025. Выпуск 1. С. 22–24.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664525. Модуль обработки запросов симуляции многоагентных сред: заявка № 2023663447 от 28.06.2023. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2023 г. (РФ), Бюл. № 7.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664526. Компонент управления для интерактивной многоагентной визуализации: заявка № 2023663447 от 28.06.2023 РФ. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2023 г. (РФ), Бюл. № 7.

8. Соловьев А.Э., Кравченко О.А., Ивутин А.Н., Шишлов М.Ю. Роевые системы беспилотных объектов: математическое описание поведения группы мобильных объектов // *Известия Российской Академии ракетных и артиллерийских наук*. 2025. № 2 (137). С. 43–49.

9. Карпов Д.В. Теория графов. СПб.: Санкт-Петербургское отделение Мат. института им. В.А. Стеклова РАН. 2017. 563 с.

10. Ивутин А.Н., Новиков А.С., Пестин М.С., Волошко А.Г. Децентрализованный протокол организации устойчивого взаимодействия абонентов в сетях с высокой динамикой изменения топологии // *Информатика и автоматизация*. 2024. № 3 (23). С. 727–765.

11. Новиков А.С., Ивутин А.Н., Пестин М.С. Алгоритм маршрутизации для обеспечения быстрого восстановления связи при обрывах маршрутов в сетях MANET // *Системы управления, связи и безопасности*. 2024. № 2. С. 14–42.