Научная статья
УДК 614.841.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-38-47

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

✉Сысоева Татьяна Павловна.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия
✉syisik@mail.ru

Аннотация. Для мониторинга объектов и территорий чрезвычайных ситуаций была создана программа для ЭВМ, предназначенная для исследования и оптимизации траекторий движения беспилотных авиационных систем в замкнутом пространстве в условиях изменяющихся внешних параметров, связанных с обеспечением безопасности полетов. Программа позволяет осуществлять симуляцию прохождения беспилотной авиационной системы по траектории двойной спирали, круговой и бустрофедона. Графическое отображение области видимости даёт оператору или аналитику возможность оценить полноту охвата территории, выявить «слепые зоны» и скорректировать траекторию для достижения максимальной информативности. Программа является современным инструментом для специалистов по управлению беспилотными авиационными системами, позволяя не только моделировать и оптимизировать траектории, но и наглядно анализировать эффективность мониторинга в сложных условиях.

Ключевые слова: мониторинг, чрезвычайная ситуация, беспилотные авиационные системы, пожар, траектория полета, программа для ЭВМ

Для цитирования: Сысоева Т.П. Численное моделирование траектории полета беспилотных авиационных систем // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 3 (79). С. 38–47. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-38-47

Scientific article

NUMERICAL SIMULATION OF THE FLIGHT PATH OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

✉Sysoeva Tatiana P.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia
✉syisik@mail.ru

Abstract. To monitor facilities and territories of emergency situations, a computer program was created designed to study and optimize the trajectories of unmanned aircraft systems in an enclosed space under conditions of changing external parameters related to flight safety. The program allows you to simulate the passage of an unmanned aircraft system along the trajectory of a double helix, circular and boustrophedon. The graphical display of the field of view gives the operator or analyst the opportunity to assess the completeness of the coverage of the territory, identify «blind spots» and adjust the trajectory to achieve maximum information content. The program is a modern tool for specialists in the management of unmanned aircraft systems, allowing not only to simulate and optimize trajectories, but also to visually analyze the effectiveness of monitoring in difficult conditions.

Keywords: monitoring, emergency, unmanned aircraft systems, fire, flight path, computer program

For citation: Sysoeva T.P. Numerical simulation of the flight path of unmanned aircraft systems // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 3 (79). P. 38–47. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-38-47

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Ведение

Мониторинг чрезвычайных ситуаций (ЧС) является важным и основополагающим направлением деятельности МЧС России. С его помощью можно выявлять источники ЧС, оценивать вероятности возникновения ЧС, прогнозировать обстановку в районе возможных ЧС, прогнозировать и оценивать возможные социально-экономические и экологические последствия, а также давать оценку параметрам риска [1–3].

Для выполнения выше перечисленных задач применяют наземные, космические и авиационные средства [4]. Одним из эффективных авиационных средств по сбору данных, анализу обстановки и принятию решений по реагированию на ЧС зарекомендовали беспилотные авиационные системы (БАС) [5–8].

Так как объекты и территории ЧС имеют разную дальность расположения, геометрические параметры и индивидуальные особенности, принято решение создать оригинальный программный продукт для исследования и оптимизации траектории полета БАС в зависимости от установленного оборудования [9] и площади осмотра ЧС [10].

Аналитическая часть

Выбор основных базовых траекторий обусловлен геометрией типичных зон ЧС. Круговая траектория оптимальна для точечного мониторинга локальных объектов (например, очага пожара или обрушения здания). Траектория «бустрофедон» применяется для сплошного покрытия протяженных прямоугольных участков лесных массивов или промышленных площадок, обеспечивая минимальные перекрытия при линейном движении. Двойная спираль эффективна для осмотра воронкообразных зон поражения или кратеров, позволяя аппарату постепенно сужать или расширять радиус облета без резких маневров, сохраняя постоянный угол обзора камеры относительно рельефа.

Математическое обеспечение программного продукта

Для построения траектории используется базовая тригонометрическая модель поля зрения. Ширина захвата сенсора (W) на уровне земли вычисляется через высоту полета (H), фокусное расстояние объектива (f) и физическую ширину матрицы (s):

$$W = \frac{2 \cdot H \cdot s}{2 \cdot f} = \frac{H \cdot s}{f}. \quad (1)$$

При задании угла обзора (α) ширина захвата определяется как:

$$W = 2 \cdot H \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right). \quad (2)$$

Координаты точек маршрута генерируются параметрически. Для круговой траектории используются уравнения окружности с шагом Δϕ, обеспечивающим перекрытие кадров не менее 20 % (коэффициент бокового перекрытия S_{lat}). Для траектории бустрофедона шаг между параллельными прямыми (D) рассчитывается как:

$$D = W \cdot \left(1 - S_{lat}\right). \quad (3)$$

Параметры летательного аппарата (фокусное расстояние, размер матрицы, максимальная скорость, угловая скорость рыскания) вводятся пользователем вручную через интерфейс (рис. 1), так как базы данных параметров всех типов БАС МЧС России могут быть неполными, что обеспечивает гибкость применения программного обеспечения.

На рис. 1 представлен интерфейс программы, а именно окно для ввода данных для построения траекторий полета БАС. Данные о летно-технических характеристиках (ЛТХ) конкретного летательного аппарата вносятся оператором вручную либо выбираются из выпадающего списка предустановленных профилей. Программа позволяет выставить угол обзора камеры, разрешение по ширине в пикселях, площадь исследуемого участка, скорость летательного аппарата. Далее запускается расчет.

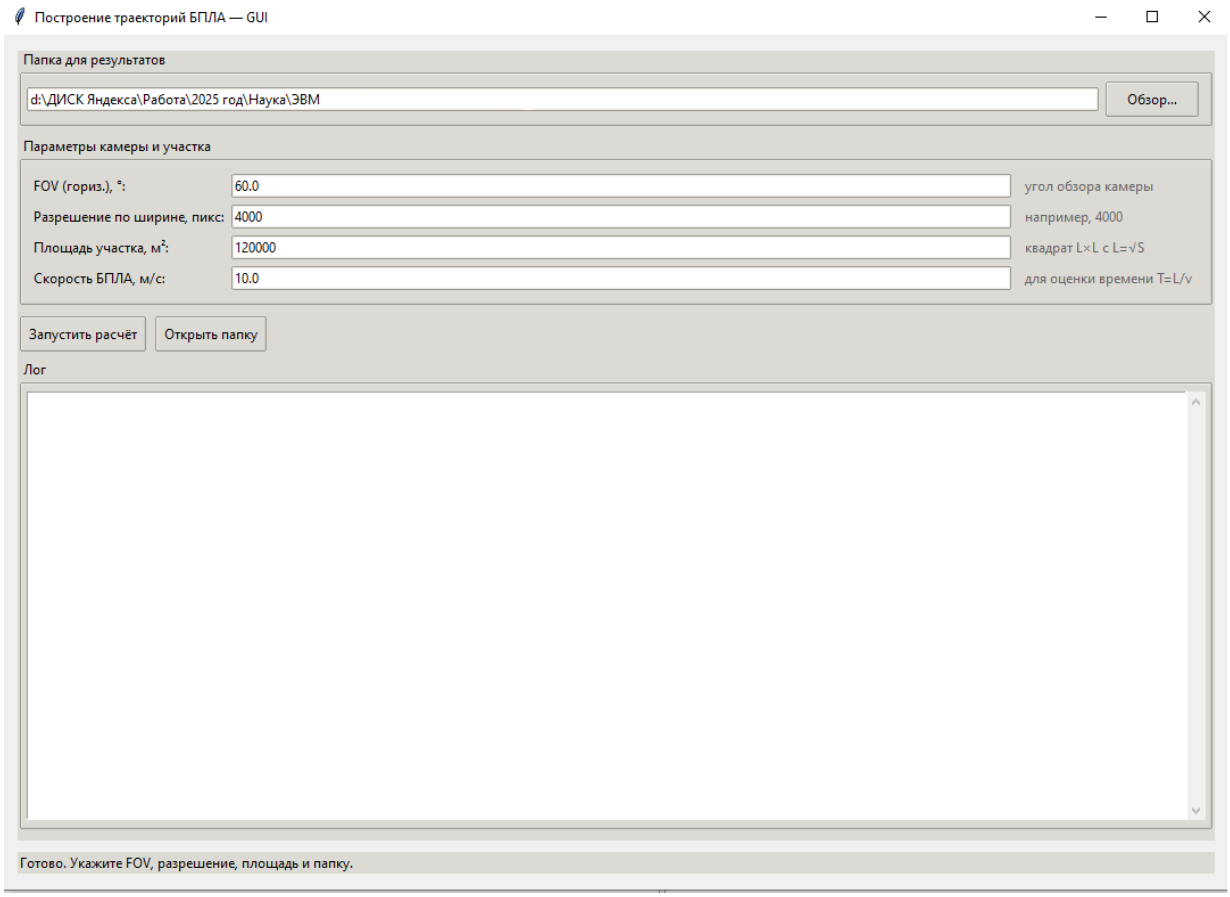


Рис. 1. **Интерфейс ввода данных для построения траекторий**

Программа предназначена для расчета движения БАС по трем разным траекториям: двойная спираль, круговая и бустрофедон.

Программный продукт симулирует прохождения БАС по разным траекториям и графически отображает область видимости по исследуемой траектории.

Результаты расчета траекторий приведены в графическом и табличном виде, а также в виде диаграмм (видимая площадь, время и длина пути) для визуализации оптимальной траектории полета.

Для создания продукта использовали язык программирования Python 3.1., поддерживается операционными системами Windows, Astra Linux.

Программный продукт является универсальным, однако математическая модель расчета радиуса виража адаптирована преимущественно под мультироторные системы (квадрокоптеры, гексакоптеры), способные зависать на месте и выполнять развороты с минимальным радиусом. Для самолётных БАС в алгоритм вводится дополнительная проверка динамических ограничений: минимально допустимый радиус кривизны рассчитывается исходя из текущей

воздушной скорости аппарата и максимально допустимой перегрузки. Если расчетный радиус поворота меньше R_{min}, программа автоматически корректирует шаг спирали или ширину полосы захвата бустрофедона».

Основная идея заключается в движении БАС по траекториям из прямых и дуг окружности так, чтобы повторных осмотров не было и чтобы радиус кривизны траектории полета не был меньше радиуса обзора камерой [11].

Далее программа оповещает пользователя о завершении расчета и предлагает перейти в папку с полученными результатами:

– отображение сравнительного анализа трех траекторий, круг, спираль, бустрофедон, относительно площади покрытия (рис. 2);

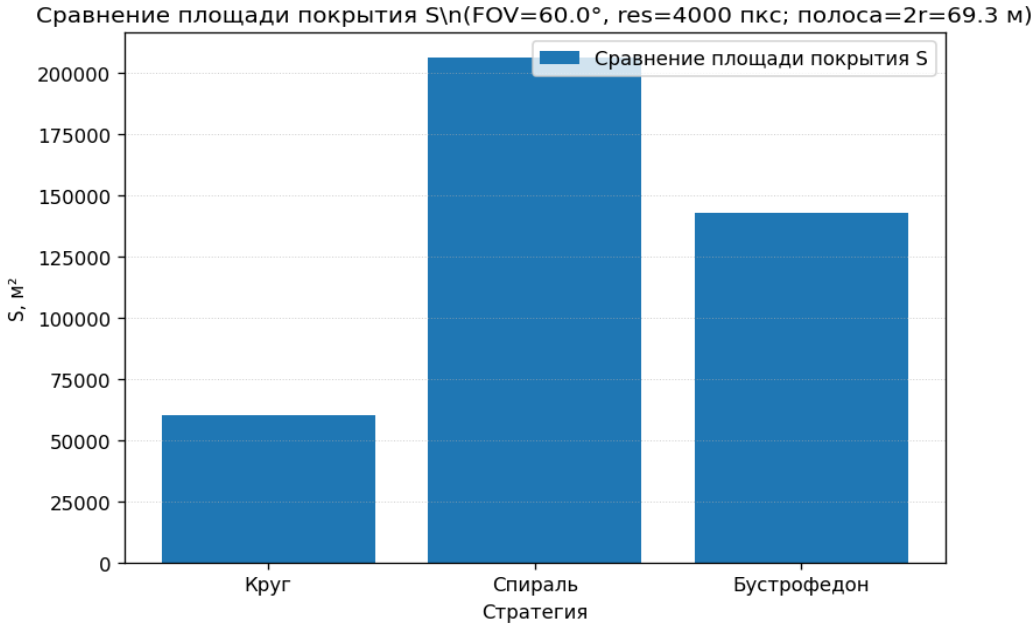


Рис. 2. **Сравнительный анализ траекторий, относительно площади покрытия**

– отображение сравнительного анализа также по трем траекториям, относительно длины пути (рис. 3);

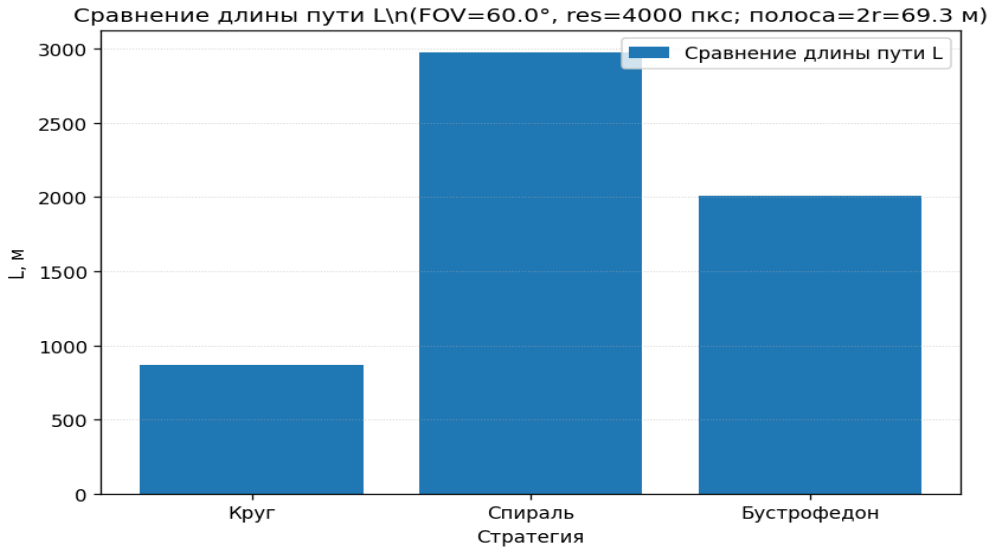


Рис. 3. **Сравнительный анализ траекторий, относительно длины пути**

– отображение сравнительного анализа, относительно пути времени, по трем предложенным траекториям (рис. 4);

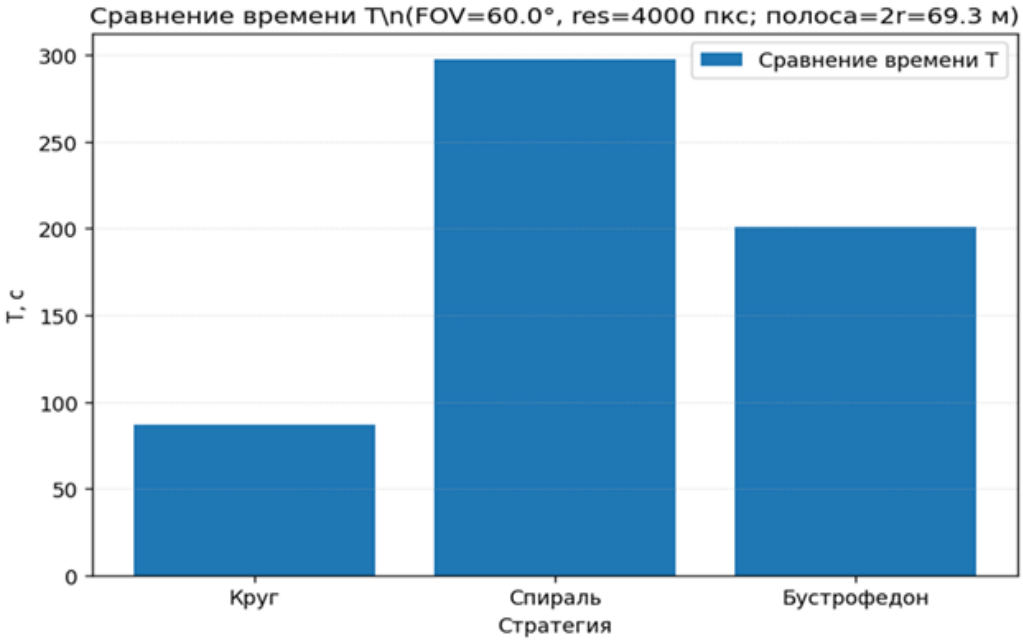


Рис. 4. **Сравнительный анализ траекторий, относительно времени симуляции прохождения БАС по круговой траектории, с точками координат (рис. 5)**

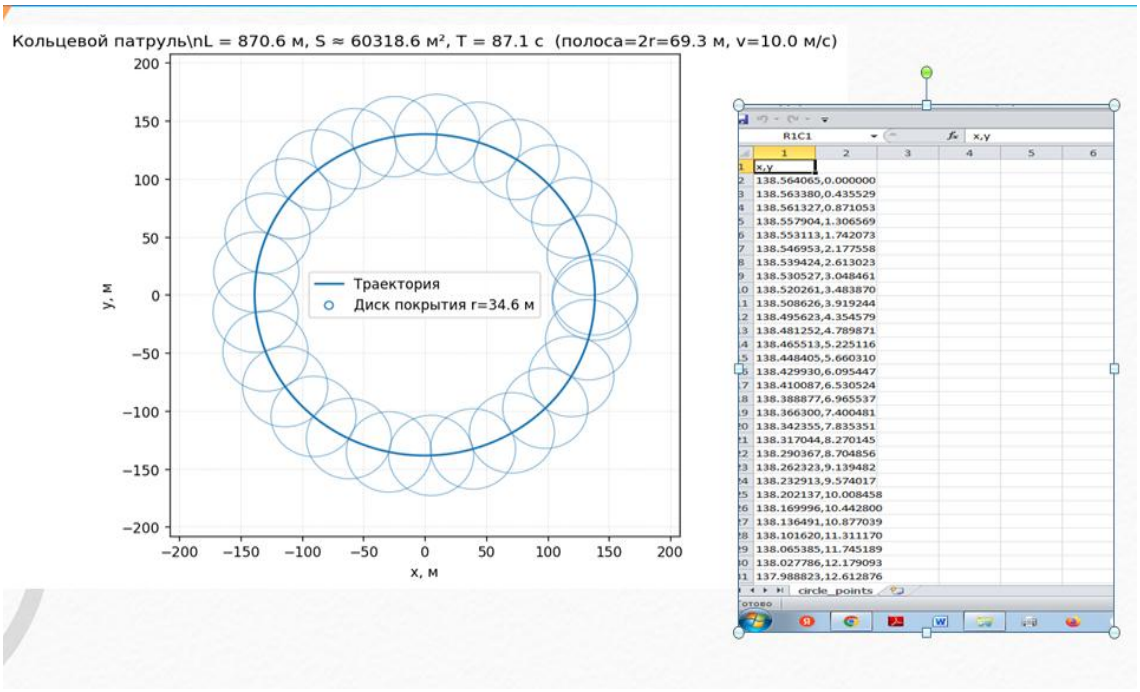


Рис. 5. **Симуляция прохождения БАС по круговой траектории и таблица с точками координат**

– симуляция прохождения БАС по траектории двойной спирали, с точками координат (рис. 6);

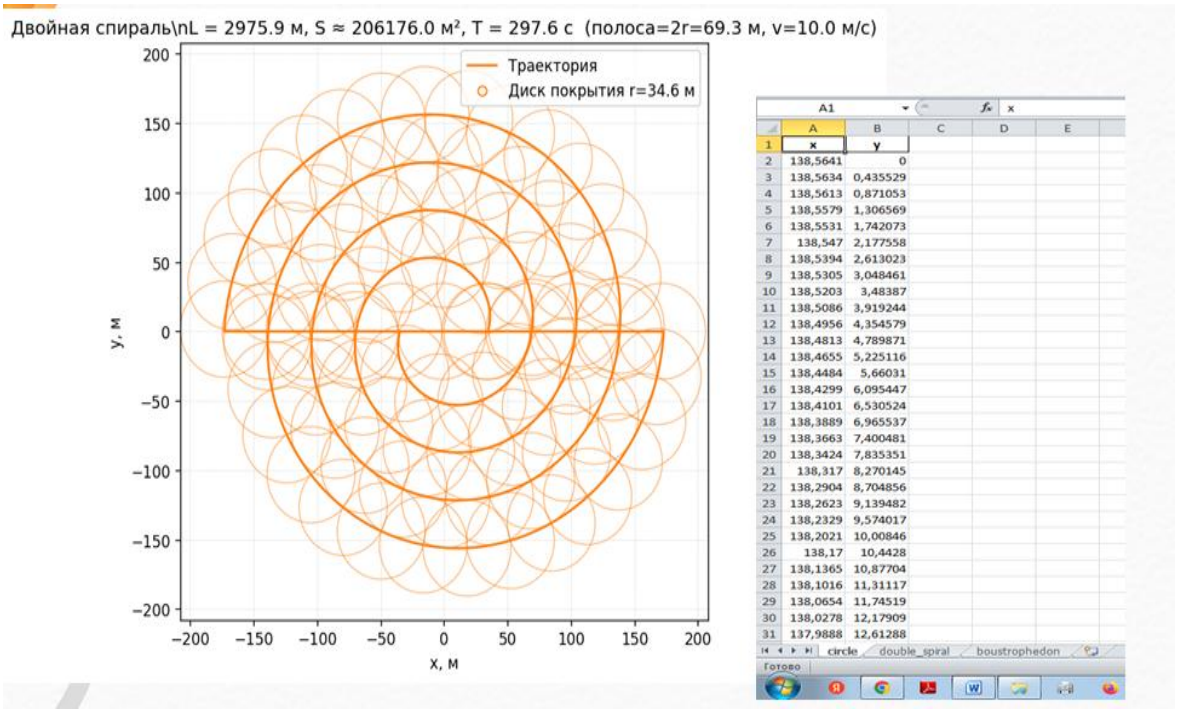


Рис. 6. **Симуляция прохождения БАС по траектории двойной спирали и точки координат**

– симуляция прохождения БАС по траектории бустрофедона, с точками координат (рис. 7).

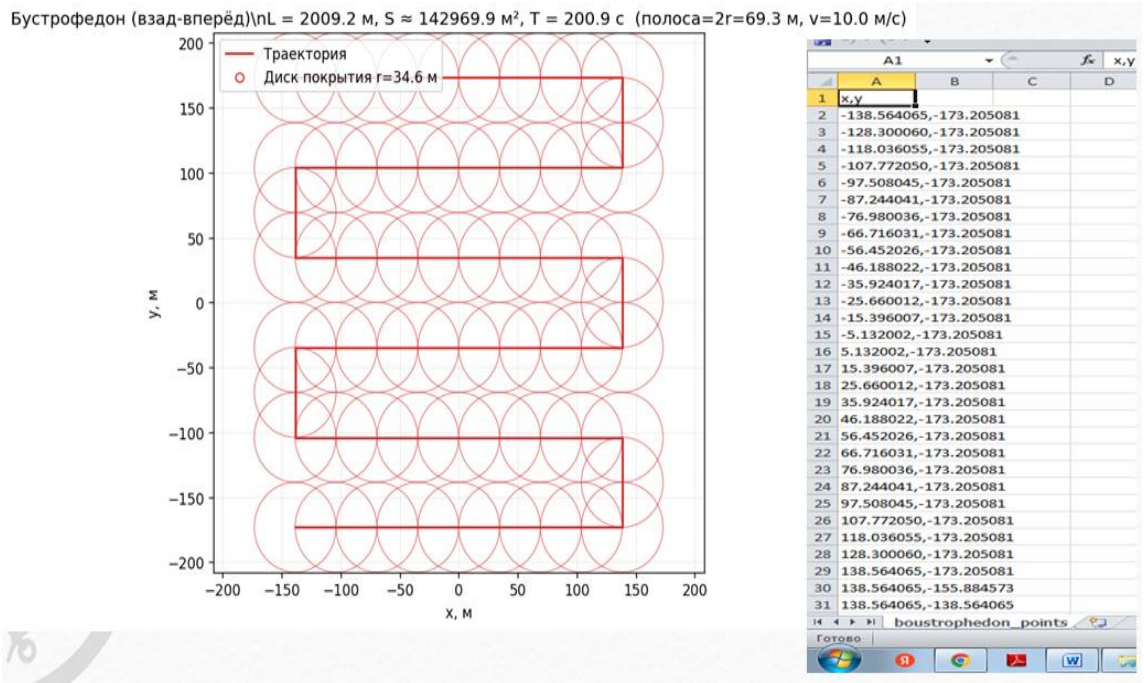


Рис. 7. **Симуляция прохождения БАС по траектории бустрофедона и точки координат**

На рис. 8 приведены основные функциональные возможности программного продукта.

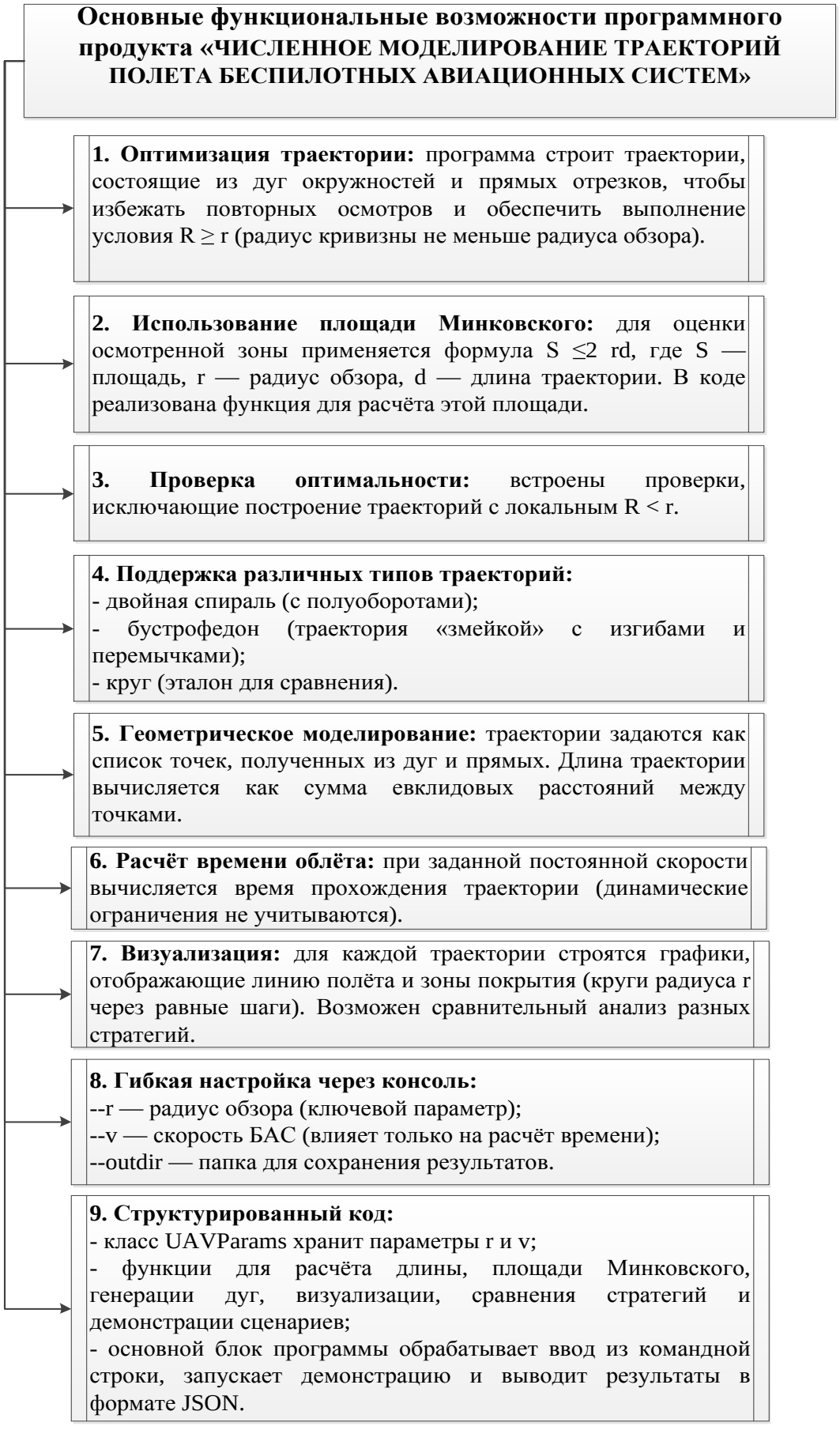


Рис. 8. **Основные функциональные возможности программного продукта**

Исходя из вышеизложенного, данный программный продукт реализует полный цикл: от генерации и анализа оптимальных траекторий до визуализации и сохранения результатов, с возможностью гибкой настройки параметров через командную строку.

Выбор оптимальной траектории напрямую влияет на показатели безопасности аварийно-спасательных работ: сокращение времени облета позволяет наземным группам быстрее получить карту термических аномалий и скорректировать маршруты выдвижения, избегая зон возможного повторного воспламенения.

Таким образом, программный продукт выступает инструментом поддержки принятия решений руководителя тушения пожара, снижая риски для личного состава.

Заключение

Механизм автоматизации заключается в реализации итерационного цикла оптимизации. После первичного расчета площади покрытия программа сравнивает её с целевой площадью участка. Если покрытие составляет менее 95 %, алгоритм автоматически уменьшает шаг между витками траектории (или ширину полосы бустрофедона) и выполняет перерасчет до достижения целевого показателя полноты охвата, исключая человеческий фактор при ручном подборе параметров.

Разработанный программный продукт позволяет автоматизировать процесс выбора и анализа оптимальных траекторий полёта БАС для мониторинга ЧС, что способствует повышению оперативности реагирования подразделений МЧС России и снижению рисков для жизни спасателей за счет заблаговременного выявления опасных факторов на маршрутах движения техники, а также повышению эффективности сбора данных, анализа обстановки и принятия оперативных решений за счёт: учёта геометрических особенностей территории и технических параметров БАС; минимизации времени и ресурсов, необходимых для мониторинга; исключения повторных осмотров и обеспечения полного покрытия заданной площади.

Программа реализует генерацию и анализ оптимальных траекторий, визуализацию и сохранение результатов, гибкую настройку параметров через командную строку. Сравнительный анализ различных типов траекторий (круг, двойная спираль, бустрофедон) по ключевым показателям (площадь покрытия, длина пути, время облёта) позволяет выбрать рациональный вариант для конкретных условий ЧС, что способствует повышению оперативности, точности и эффективности мониторинга ЧС.

Список источников

1. Поиск эффективных решений при оперативном управлении в условиях чрезвычайных ситуаций / Д.С. Бутенков [и др.] // Проблемы формирования кадрового состава органов государственного и муниципального управления на современном этапе: материалы IV межкаф. конф. М.: Академия ГПС МЧС России, 2021. С. 72–80. EDN FUSFFD.

2. Зыков В.И., Поляков Ю.А., Журавлев Д.Е. Система мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций для обеспечения комплексной безопасности объектов МЧС России // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2017. № 4. С. 12–17. EDN ZXKWTF. DOI: 10.25257/FE.2017.4.12-17

3. Логико-вероятностная оценка живучести и эффективности беспилотных летательных аппаратов при проведении разведки зоны ЧС: некоторые возможности методического подхода / Р.А. Дурнев [и др.] // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2021. № 3. С. 17–25.

4. Ермакова А.С., Кравцева Е.И., Карауш С.А. Прогнозирование и предупреждение стихийных природных явлений и техногенных катастроф с помощью систем космического мониторинга // Экология и безопасность техносфере: современные проблемы и пути решения: сб. трудов Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов,

Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2017. С. 625–628. EDN XUDTDN.

5. Сысоева Т.П. Применение беспилотных воздушных судов в системе инновационных разработок по анализу наблюдения и контроля развития чрезвычайных ситуаций // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы: материалы Междунар. науч.-практ. семинара в рамках Международного форума. СПб.: С.-Петерб. ун-т ГПС МЧС России, 2024. С. 26–30. EDN ZUFWQY.

6. AlAli Z.T., Alabady S.A. The role of unmanned aerial vehicle and related technolo-gies in disasters // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2022. Vol. 28. P. 100873. DOI: 10.1016/j.rsase.2022.100873

7. Software package for searching people and vehicles using unmanned aerial vehicles / D. Bulatitskiy [et al.] // CEUR Workshop Proceedings. Nizhny Novgorod, 2021. P. 942–953. EDN EBRSFK.

8. Control of unmanned aerial vehicles during fire situation monitoring / V.N. Evdokimenkov [et al.] // INCAS Bulletin. 2019. Vol. 11. № 1. P. 67–73. EDN FMNCZK. DOI: 10.13111/2066-8201.2019.11.S.7

9. Численное моделирование траекторий полета беспилотных авиационных систем: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693741 Рос. Федерация / А.В. Калач, Т.П. Сысоева, П.М. Агеев, А.Л. Шкерин; заявл. 17.11.2025; опубл. 01.12.2025. EDN SSDDUO.

10. Программа для определения траектории движения летательного аппарата на основе анализа последовательности кадров, полученных с бортовой камеры: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619432 Рос. Федерация. № 2017616206 / И.О. Архипов, М.О. Еланцев; заявл. 27.06.2017; опубл. 24.08.2017. EDN ZEIAES.

11. Карпачев А.Ю., Кузнецова Д.Д., Морозов Е.П. Формирование траекторий движения дрона двухвинтовой осевой схемы // XLVII Академические чтения по космонавтике 2023: сб. тезисов, посвященный памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2023. Т. 3. С. 47–48. EDN DDYASL.

References

1. Poisk effektivnyh reshenij pri operativnom upravlenii v usloviyah chrezvychajnyh situacij / D.S. Butenkov [i dr.] // Problemy formirovaniya kadrovogo sostava organov gosudarstvennogo i municipal'nogo upravleniya na sovremennom etape: materialy IV mezhkaf. konf. M.: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2021. S. 72–80. EDN FUSFFD.

2. Zykov V.I., Polyakov Yu.A., Zhuravlev D.E. Sistema monitoringa i prognozirovaniya chrezvychajnyh situacij dlya obespecheniya kompleksnoj bezopasnosti ob"ektov MCHS Rossii // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2017. № 4. S. 12–17. EDN ZXKWTF. DOI: 10.25257/FE.2017.4.12-17

3. Logiko-veroyatnostnaya ocenka zhivuchesti i effektivnosti bespilotnyh letatel'nyh apparatov pri provedenii razvedki zony CHS: nekotorye vozmozhnosti metodicheskogo podhoda / R.A. Durnev [i dr.] // Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij. 2021. № 3. S. 17–25.

4. Ermakova A.S., Kravceva E.I., Karaush S.A. Prognozirovanie i preduprezhdenie stihijnyh prirodnyh yavlenij i tekhnogennyh katastrof s pomoshch'yu sistem kosmicheskogo monitoringa // Ekologiya i bezopasnost' tekhnosfere: sovremennye problemy i puti resheniya: sb. trudov Vseros. nauch.-prakt. konf. molodyh uchenyh, aspirantov i studentov, Tomsk: Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politekhnicheskij universitet, 2017. S. 625–628. EDN XUDTDN.

5. Sysoeva T.P. Primenenie bespilotnyh vozdushnyh sudov v sisteme innovacionnyh razrabotok po analizu nablyudeniya i kontrolya razvitiya chrezvychajnyh situacij // Servis

bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. Seminara v ramkah Mezhdunarodnogo foruma. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2024. S. 26–30. EDN ZUFWQY.

6. AlAli Z.T., Alabady S.A. The role of unmanned aerial vehicle and related technolo-gies in disasters // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2022. Vol. 28. P. 100873. DOI: 10.1016/j.rsase.2022.100873

7. Software package for searching people and vehicles using unmanned aerial vehicles / D. Bulatitskiy [et al.] // CEUR Workshop Proceedings. Nizhny Novgorod, 2021. P. 942–953. EDN EBRSFK.

8. Control of unmanned aerial vehicles during fire situation monitoring / V.N. Evdokimenkov [et al.] // INCAS Bulletin. 2019. Vol. 11. № 1. P. 67–73. EDN FMNCZK. DOI: 10.13111/2066-8201.2019.11.S.7

9. Chislennoe modelirovanie traektorij poleta bespilotnyh aviacionnyh sistem: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2025693741 Ros. Federaciya / A.V. Kalach, T.P. Sysoeva, P.M. Ageev, A.L. Shkerin; zayavl. 17.11.2025; opubl. 01.12.2025. EDN SSDDUO.

10. Programma dlya opredeleniya traektorii dvizheniya letatel'nogo apparata na osnove analiza posledovatel'nosti kadrov, poluchennyh s bortovoj kamery: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2017619432 Ros. Federaciya. № 2017616206 / I.O. Arhipov, M.O. Elancev; zayavl. 27.06.2017; opubl. 24.08.2017. EDN ZEIAES.

11. Karpachev A.Yu., Kuznecova D.D., Morozov E.P. Formirovanie traektorij dvizheniya drona dvuhvintovoj osevoj skhemy // XLVII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike 2023: sb. tezisov, posvyashchennyj pamyati akademika S.P. Korolyova i drugih vydayushchihsya otechestvennyh uchenyh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva. M.: Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. N.E. Baumana (nacional'nyj issledovatel'skij universitet), 2023. T. 3. S. 47–48. EDN DDYASL.

Информация о статье:
Статья поступила в редакцию: 27.04.2026; одобрена после рецензирования: 20.05.2026;
Принята к публикации: 03.07.2026
The information about article:
The article was submitted to the editorial office: 27.04.2026; approved after review: 20.05.2026;
Accepted for publication: 03.07.2026

Информация об авторах:
Сысоева Татьяна Павловна, старший научный сотрудник отдела инновационных и информационных технологий в экспертизе пожаров исследовательского центра экспертизы пожаров научно-исследовательского института перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, доцент, e-mail: syisik@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0230-465X, SPIN-код: 3683-2066

Information about the authors:
Sysoeva Tatiana P., senior researcher of the department of innovative and information technologies in the examination of fires of the research center for the examination of fires of the research institute for advanced research and innovative technologies in the field of life safety of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave, 149), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: syisik@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0230-465, SPIN: 3683-2066