



MPHTI 89.01.94



<https://doi.org/10.56132/2791-3368-2026-2-66-86-112>

А.У. Калижанова^{1,2}, М. Кунелбаев^{1,3}, С. Дәруіш^{1,3}

¹Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK,
Алматы, Казахстан

²Energo University, Алматы, Казахстан

³Farabi University, Алматы, Казахстан

E-mail: kalizhanova_aliya@mai.ru

РАЗРАБОТКА GIS-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОН ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ СТУПЕНЕЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Аннотация. В статье рассматривается GIS-ориентированная методика прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя на основе интеграции детерминированного моделирования траектории, стохастического анализа неопределённости и пространственной оценки риска. Предлагаемый подход объединяет лётно-технические параметры ступени, метеорологические данные и геопро пространственную информацию в рамках единой вычислительной схемы, обеспечивающей расчёт номинальной траектории, формирование вероятностной области падения и построение цифровых карт риска. Для верификации подхода были рассмотрены три сценария, различающиеся массой ступени, скоростью ветра и углом отделения. Выполнено сравнение классической баллистической модели, стохастической модели Монте-Карло и модели с элементами искусственного интеллекта и машинного обучения. Показано, что применение современных методов позволяет снизить среднюю ошибку прогноза до 60 м, уменьшить стандартное отклонение до 25 м и сократить долю выхода за пределы безопасной зоны до 1%. Пространственный анализ риска показал, что наиболее уязвимыми являются территории с высокой плотностью населения и наличием критической инфраструктуры. Полученные результаты подтверждают, что интеграция траекторного моделирования, анализа неопределённости и GIS-инструментов повышает точность прогноза и практическую значимость системы для поддержки принятия решений при обеспечении безопасности космических запусков.

Ключевые слова: ракета-носитель, отделяющаяся ступень, прогнозирование зон падения, GIS, стохастическое моделирование, пространственная оценка риска, метод Монте-Карло, AI/ML.



Введение.

Повышение темпов развития аэрокосмической отрасли и рост количества пусков ракет-носителей обуславливают растущую потребность в точных, гибких и масштабируемых системах оценки рисков, связанных с падением отделяющихся частей ракет. Особенно важной становится задача оперативного определения зон возможного поражения на поверхности Земли и интеграции этих данных в системы поддержки решений, работающие в режиме реального времени. Вместо традиционных методов расчёта траекторий, основанных на классической баллистике, всё чаще применяются гибридные технологии, включающие элементы машинного обучения, адаптивного моделирования и геоинформационного анализа.

В работе [1] представлен обзор современных систем разделения и сброса в аэрокосмических аппаратах с детальным сравнительным анализом эффективности различных конструктивных решений. Особое внимание уделено математическим моделям поведения отделяющихся частей после расцепления, а также адаптивным подходам к обеспечению безопасности, включая применение ГИС для оценки зон потенциальной опасности. Подчёркивается важная роль перспективных материалов, электромеханических систем и алгоритмов управления при снижении рисков аварийных ситуаций. Статья [2] посвящена всестороннему математическому исследованию траектории ступеней ракет после отделения с учётом аэродинамических факторов и воздействия метеоусловий. В работе применяется система дифференциальных уравнений, учитывающая изменение массы, сопротивление воздушной среды и боковой ветер, что обеспечивает достоверное моделирование движения объектов. Ключевым элементом исследования является калибровка моделей по данным прошлых пусков, а также оценка вероятности попадания обломков за пределы зоны безопасности. Рассматриваются подходы к формированию карт зон падения с интеграцией в отечественные геоинформационные системы. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает высокую точность и практическую применимость разработанной методики при оперативном планировании. Предусмотрена комплексная система оповещения с автоматической генерацией карт и рекомендаций для служб безопасности. В публикации [3] представлен полуколичественный алгоритм оценки рисков повреждения наземных сооружений обломками ракет. Для улучшения достоверности расчётов применяется интеграция баллистических симуляций с геоинформационными системами, что обеспечивает динамическое обновление зон риска с учётом текущих метеоданных и навигационной информации. Описан подход к пространственно-временному моделированию: прогнозируется не только координаты возможного падения, но и вероятность появления опасного объекта, а также временные рамки его появления. Приведены примеры практического применения на китайских космодромах, а также результаты сравнения с традиционными моделями. Отмечается важность использования адаптивных методик, позволяющих



оперативно вносить коррективы в расчёты при изменении траектории полёта или метеоусловий. В исследовании [4] предложен комплексный подход к оценке угрозы для населения и объектов инфраструктуры со стороны обломков ракет, основанный на объединении баллистического моделирования и пространственного анализа в системах GIS. С использованием передовых геоинформационных технологий строятся карты вероятных зон падения, а также разрабатываются сценарные модели снижения ущерба. В работе реализован алгоритм динамического пересчета границ зон риска с учётом актуализированных траекторий и метеосведений. Эффективность метода проиллюстрирована на примерах фактических пусков, продемонстрировавших возможность автоматической генерации оповещений для граждан и органов управления. В работе [5] рассматривается моделирование динамики разделения ступеней с учётом многосвязных взаимодействий, переходных явлений и аэродинамических факторов. Показано, что использование адаптивных алгоритмов и методов Монте-Карло позволяет учитывать неопределённости начальных условий и формировать вероятностные зоны возможного падения объектов. Полученные результаты интегрируются в ГИС, что обеспечивает возможность пространственного анализа рисков и применение модели в системах поддержки решений. В статье [6] исследуется влияние случайных боковых нагрузок в сопле на динамику ракеты при полёте на малых высотах. Для описания случайного смещения линии отрыва пограничного слоя и связанных с ним угловых и поступательных откликов ракеты используется процесс Орнштейна–Уленбека. Показано, что предложенная аналитическая модель хорошо согласуется с результатами высокоточных численных расчётов и позволяет определить практические способы снижения угловых отклонений и повышения демпфирования после прекращения боковых нагрузок. В работе [7] предложен стохастический подход к анализу траекторий ракетных элементов под воздействием случайных боковых нагрузок с использованием процесса Орнштейна–Уленбека. Показано, что учёт случайных аэродинамических возмущений позволяет точнее описывать распределение возможных точек падения и оценивать риск отклонений траектории. Авторы подчеркивают важность включения таких эффектов в системы раннего предупреждения и контроля безопасности полёта. В исследовании [8] предложен интегрированный подход к оценке рисков для населения и объектов инфраструктуры, основанный на сочетании баллистических моделей и ГИС-технологий. С помощью пространственного анализа строятся карты потенциальных зон падения фрагментов и разрабатываются сценарии снижения ущерба. Представлен алгоритм динамической корректировки границ зон опасности с учётом поступающей информации о траектории движения и метеоусловий. Рассматривается реализуемость автоматической генерации оповещений для жителей и уполномоченных органов. В работе [9] детально анализируется взаимодействие с базами данных землепользования, позволяющее учитывать



степень застройки и расположение объектов повышенной значимости. Приводятся критерии оценки эффективности моделей, а также методы их проверки на основе практических реализаций. В работе [10] представлена математическая модель динамики многократного разделения ступеней, учитывающая аэродинамические параметры, внутренние взаимодействия и внешние факторы. Показано, что настройка модели под реальные метеоро- и полётные данные позволяет повысить достоверность определения координат падения. Полученные результаты визуализируются в геоинформационной системе и могут применяться в системах поддержки решений при эксплуатации пусковых комплексов. В статье [11] представлена разработанная и протестированная модель прогнозирования зон падения ускорителей с учётом фактического профиля ветра и аэродинамических факторов на различных высотах. Для точного определения траектории в реальном времени применяются адаптивные фильтры, основанные на данных радаров и спутников. Интеграция полученных результатов в ГИС обеспечивает возможность использования модели для оповещения, организации наземных мероприятий и повышения достоверности прогноза. В работе [12] анализируется интеграция расчётов баллистических траекторий с геоинформационными системами с целью формирования зон падения ступеней ракет и их обломков. Показано, что сочетание геопространственного анализа с метеоданными и демографической информацией даёт возможность создавать интерактивные карты угроз и генерировать автоматические отчёты для служб обеспечения безопасности. В работе [13] анализируются подходы к адаптивному управлению и оптимизации траектории многоступенчатых ракет, направленные на уменьшение вероятности падения и повышение точности доставки полезного груза. Применяются гибридные методы, объединяющие традиционное моделирование, технологии машинного обучения и интеграцию с ГИС. В статье [14] рассматривается создание автоматизированных GIS-систем для прогнозирования зон падения ступеней ракет на космодромах России. Авторы интегрируют баллистические расчёты, пространственный анализ и визуализацию, учитывая рельеф местности, использование земель и метеоданные. Показано, что подобная интеграция обеспечивает оперативное обновление карт и отчётов в режиме реального времени, а также повышает эффективность взаимодействия между различными ведомствами. В исследовании [15] представлен метод оценки угрозы для населения и объектов инфраструктуры при падении обломков ракет с использованием статистического анализа, моделирования Монте-Карло и ГИС. Показано, что включение результатов моделирования в цифровые карты позволяет оперативно выявлять зоны с наибольшей вероятностью поражения и применять полученные данные для организации эвакуационных действий. В статье [16] представлен обзор концепции цифрового двойника и его применения в киберфизических производственных системах. Показано, что цифровые двойники используются для моделирования, мониторинга в



реальном времени, оптимизации и поддержки принятия решений на всех этапах жизненного цикла. В книге [17] представлено практическое руководство по работе с QGIS (Quantum geographic information systems) как открытой геоинформационной платформой. Рассматриваются основные функции системы, включая импорт данных, визуализацию, пространственный анализ и создание интерактивных карт. Данный источник полезен как методическая база для применения GIS-инструментов в задачах картирования и пространственной оценки риска. В работе [18] оценивается угроза для населения стран глобального Юга, обусловленная неуправляемым проникновением верхних ступеней ракет и их обломков в атмосферу. Предлагается введение нормативно-правового регулирования, направленного на предотвращение сбоев при контролируемом возвращении объектов. В работе [19] приведён обзор моделей 1D/3D (MOCAT, SOLEM и др.) с детальным рассмотрением алгоритмов распространения обломков и становления корейской инженерной космической школы. В исследовании [20] представлена физико-экономическая модель загрязнения низкой околоземной орбиты, свидетельствующая о вероятности наступления синдрома Кesslera в период с 2035 по 2048 год при отсутствии мер по снижению рисков. В работе [21] предложена математическая модель траекторий сферических космических обломков разных размеров с учётом сопротивления атмосферы, при этом значительная часть параметров падения рассчитывается аналитически. В исследовании [22] представлена математическая модель двухуровневой задачи коммивояжёра, предназначенная для составления плана миссий по ликвидации космических обломков, при этом для расчёта приращения скорости Δv и оптимизации траектории применяются нейросети глубокого обучения и методы обучения с подкреплением. В исследовании [23] изучаются моделирование и анализ хода разделения ступеней двухступенчатых многоразовых ракет-носителей. Особое внимание уделяется динамике относительного движения элементов после отделения, оценке устойчивости хода процесса, а также влиянию аэродинамических параметров на безопасность полёта. В статье [24] рассматривается моделирование многоступенчатой динамики разделения с применением метода уравнений связей. Её значение заключается в повышении точности учёта взаимодействия отделяющихся элементов в переходной период. В исследовании [25] изучены аэродинамические свойства процесса отделения первой ступени ракеты Ares I, создана соответствующая справочная база данных для расчётов. Проведённый анализ демонстрирует влияние аэродинамических показателей на траекторию движущихся частей ракеты после отделения. В работе [26] продолжено использование метода уравнений сил связи при решении задач разделения ступеней ракеты-носителя. Показана возможность более точного численного моделирования взаимного движения ступеней и оценки надёжности их разделения. В работе [27] анализируется применение метода Монте-Карло при проектировании ракеты-носителя и проверке соответствия



установленным требованиям. Основной вклад исследования заключается в показе того, как вероятностное моделирование помогает учитывать неопределённости параметров и оценивать диапазон возможных исходов. Исследование [28] посвящено анализу рисков и неопределённостей, обусловленных непреднамеренным проникновением искусственных космических объектов в атмосферу Земли. В работе рассматривается вероятностная природа их падения, а также факторы, оказывающие влияние на достоверность расчётов уровня угрозы. В статье [29] приведён статистический анализ неконтролируемых входов космических аппаратов и ракетных ступеней в атмосферу за последнее десятилетие. Исследование даёт возможность выявить общие тенденции, частоту подобных инцидентов, а также особенности распределения связанных с ними рисков. Статья [30] посвящена угрозам, связанным с возвращением спутниковых систем в атмосферу, особенно на фоне увеличения объёмов крупных орбитальных группировок. В исследовании [31] поднимается вопрос оценки и минимизации угроз, связанных с неконтролируемыми повторными входами искусственных космических тел, с учётом текущих и перспективных тенденций развития космической отрасли. В статье [32] анализируется влияние возвращения космических объектов на безопасность воздушного пространства, включая необходимость временного закрытия определённых зон. Указывается, что опасность падения космических обломков касается не только наземных объектов инфраструктуры, но и авиационного движения.

Целью данного исследования является разработка архитектуры и базовых модулей многофункционального GIS-ресурса для прогнозирования зон падения отделяющихся частей ракет. Предлагаемая модель основана на сочетании баллистических, стохастических и адаптивных подходов с картографическим моделированием, автоматической генерацией тематических карт и возможностью последующей интеграции с внешними системами, включая платформы мониторинга, цифровые двойники территорий, метеорологические сервисы, а также информационно-аналитические системы служб гражданской защиты.

Материалы и методы.

Предлагаемая методика объединяет физически обоснованное моделирование траектории, стохастический анализ неопределённости и пространственную оценку риска на основе GIS в рамках единой вычислительной схемы прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. В отличие от исключительно картографического подхода, данная схема начинается с физических параметров отделения ступени и атмосферных условий, далее выполняется расчёт траектории с учётом аэродинамических возмущений, после чего результаты моделирования передаются в геоинформационную среду для пространственного анализа, зонирования риска и поддержки принятия решений.

Входные данные, использованные в исследовании, были разделены на три группы: лётно-технические и конструктивные параметры ступени, метеорологические параметры и геопространственные данные. В первую группу входили масса отделяющейся ступени, начальная скорость, угол отделения, характерная площадь поперечного сечения и коэффициент аэродинамического сопротивления. Во вторую группу входили скорость и направление ветра, плотность воздуха и атмосферные условия, влияющие на траекторию снижения. В третью группу входили цифровые картографические слои, описывающие населённые пункты, транспортные коридоры, гидрографические объекты, административные границы, плотность населения и критическую инфраструктуру.

Перед моделированием все пространственные слои были приведены к единой системе координат и загружены в GIS-среду в виде векторных и растровых наборов данных. Этап предварительной обработки включал валидацию данных, удаление неполных записей, нормализацию тематических атрибутов и пространственную привязку разнородных источников. Данный этап обеспечивал согласованность последующего численного моделирования и снижал влияние ошибок входных данных на прогнозируемые зоны падения.

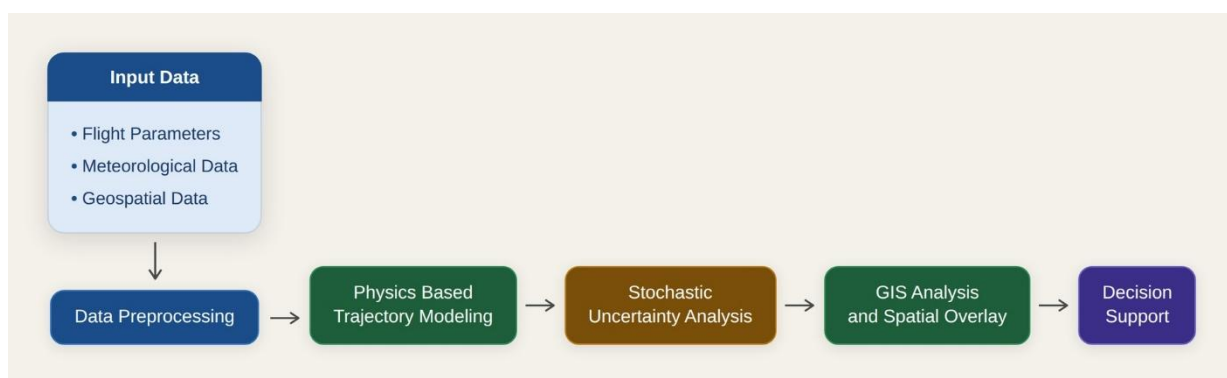


Рисунок 1 - Общая схема предлагаемой методики прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя

На рисунке 1 представлена общая схема предлагаемой методики прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. Схема объединяет три группы исходных данных — лётно-технические параметры, метеорологические данные и геопространственную информацию — с последующей предварительной обработкой, физико-математическим моделированием траектории, стохастическим анализом неопределённости, GIS-анализом и поддержкой принятия решений. Такая структура отражает последовательное преобразование разнородных исходных данных в пространственные оценки риска, которые могут использоваться для анализа безопасности и оперативного планирования.

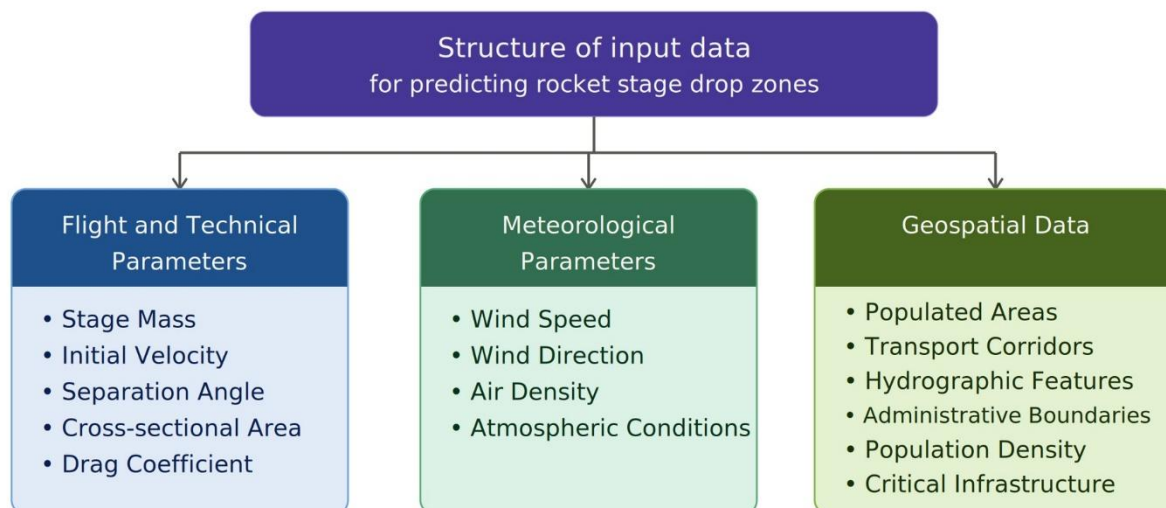


Рисунок 2 - Структура входных данных, используемых для прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя

На рисунке 2 представлена структура входных данных, используемых для прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. Все исходные данные разделены на три основные группы: лётно-технические параметры, метеорологические параметры и геопространственные данные. Такая структура показывает, что точность прогнозирования определяется не одним набором параметров, а комплексной интеграцией физических характеристик ступени, атмосферных условий и пространственной информации о территории.

Детерминированная модель траектории.

Движение отделившейся ступени ракеты после отделения описывалось детерминированной динамической моделью, учитывающей силу тяжести и аэродинамическое сопротивление в условиях бокового ветра. Состояние объекта задавалось вектором положения $r(t)$ и вектором скорости $v(t)$. Траектория рассчитывалась от момента отделения до пересечения объектом поверхности Земли.

Определяющие уравнения могут быть записаны в виде:

$$dr/dt = v, \quad (1)$$

$$m \cdot dv/dt = m \cdot g + F_a, \quad (2)$$

где m - масса отделившейся ступени, g - вектор ускорения свободного падения, а F_a - сила аэродинамического сопротивления.

$$F_a = -0.5 \cdot C_D \cdot \rho(h) \cdot S \cdot |v - v_w| \cdot (v - v_w), \quad (3)$$

где C_D — коэффициент сопротивления, $\rho(h)$ — плотность воздуха как функция высоты h , S — характерная площадь, а v_w — вектор скорости ветра. Таким образом, относительная скорость тела по отношению к атмосфере

учитывалась явно, что принципиально важно для прогнозирования бокового сноса и конечных координат падения.

Детерминированное решение данной системы позволяло получить номинальную траекторию и ожидаемую точку падения для заданного набора начальных и атмосферных условий.

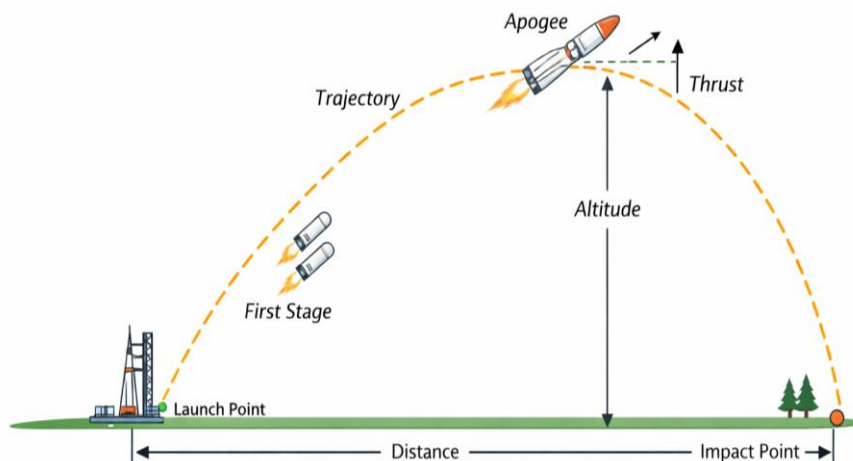


Рисунок 3 - Детерминированная модель траектории полёта отделяющейся ступени ракеты-носителя

На рисунке 3 представлена детерминированная модель траектории полёта отделяющейся ступени ракеты-носителя. Схема иллюстрирует расчёт движения объекта от точки старта до предполагаемой точки падения с учётом основных параметров траектории, включая дальность, высоту и характерную баллистическую дугу полёта. Такой подход позволяет определить номинальную траекторию движения ступени при заданных начальных условиях и использовать её как базу для дальнейшего анализа зон падения и оценки риска.

Стохастическое моделирование неопределённости.

Поскольку реальное снижение отделяющихся ступеней зависит от неопределённости аэродинамических, метеорологических параметров и начальных условий, детерминированная модель была расширена с использованием стохастического моделирования. В предлагаемой схеме неопределённые параметры, такие как скорость ветра, коэффициент сопротивления, угол отделения и начальная скорость, рассматривались как случайные величины в пределах физически допустимых диапазонов.

Для каждого прогона моделирования j формировался вектор параметров

$$X_j = [m_j, C_{D,j}, \theta_j, v_{\theta,j}, v_{w,j}(h)], \quad (4)$$

а соответствующая точка падения (x_j, y_j) определялась с помощью решателя траектории. После N повторных моделирований средние координаты падения оценивались как

$$x_{\text{mean}} = (1/N) \cdot \sum x_i \quad (5)$$

$$y_{\text{mean}} = (1/N) \cdot \sum x_i \quad (6)$$

а дисперсии координат рассчитывались по формулам:

$$\sigma_x = \sqrt{[(1/N) \cdot \sum (x_j - y_{\text{mean}})^2]} \quad (7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{[(1/N) \cdot \sum (x_j - y_{\text{mean}})^2]} \quad (8)$$

Такая процедура позволяла формировать вероятностную зону падения вместо одной детерминированной точки. Кроме того, вероятность выхода ступени за пределы заданной безопасной зоны оценивалась как

$$P_{\text{out}} = N_{\text{out}} / N, \quad (9)$$

где N_{out} — число смоделированных траекторий, для которых точки падения оказались вне допустимой области. Такое вероятностное представление является более подходящим для оперативного планирования безопасности, поскольку оно явно отражает неопределённость.

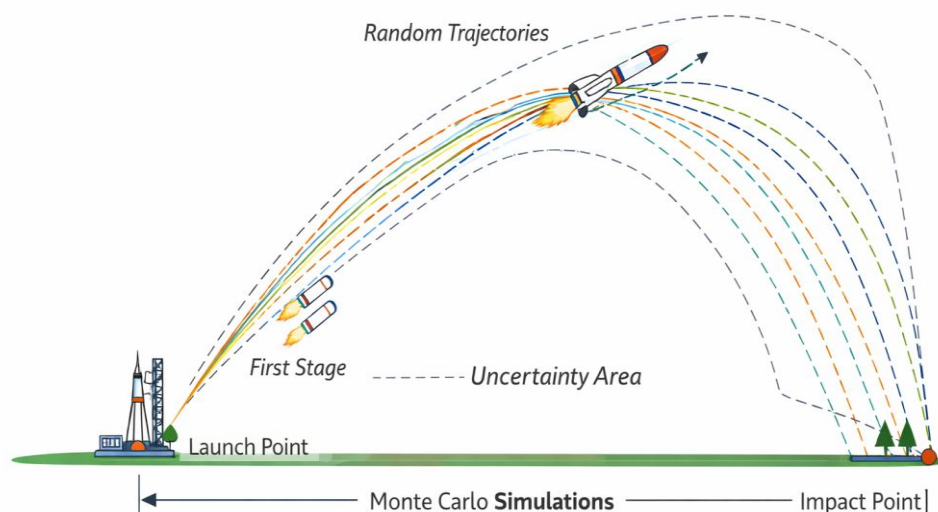


Рисунок 4 - Схема стохастического моделирования неопределённости траектории отделяющейся ступени ракеты-носителя

На рисунке 4 представлена схема стохастического моделирования неопределённости траектории отделяющейся ступени ракеты-носителя. В отличие от детерминированного подхода, здесь показан набор возможных траекторий, формируемых при многократных расчётах с варьированием исходных параметров, что позволяет отразить влияние случайных факторов и внешних возмущений. Такая модель даёт возможность определить область неопределённости возможного падения ступени и использовать её для более реалистичной оценки риска и последующего пространственного анализа в GIS-среде.



Пространственная оценка риска на основе GIS.

После численного моделирования рассчитанные точки падения и вероятностные зоны рассеивания переносились в GIS-среду. Затем выполнялся пространственный оверлейный анализ для оценки взаимодействия прогнозируемых зон падения с уязвимыми территориальными объектами. В частности, полученные зоны падения пересекались со слоями плотности населения, землепользования, транспортной инфраструктуры, населённых пунктов и критически важных объектов.

Для ранжирования опасных территорий использовался интегральный пространственный показатель риска в следующем обобщённом виде:

$$R_i = P_i \cdot (w_1 \cdot D_i + w_2 \cdot C_i + w_3 \cdot L_i), \quad (10)$$

где R_i — показатель риска для зоны i , P_i — прогнозируемая вероятность падения в этой зоне, D_i — плотность населения, C_i — индикатор наличия критической инфраструктуры, L_i — фактор землепользования или экологической чувствительности, а w_1, w_2, w_3 — весовые коэффициенты, отражающие относительный вклад каждого компонента. Такая запись позволяла перейти от простого прогноза координат к более практической интерпретации территориальной опасности.

Итогом данного этапа являлся набор цифровых тематических карт, отображающих ожидаемые точки падения, вероятностные контуры и классы территориального риска. Эти карты использовались как основа для визуального анализа, формирования предупреждений и поддержки профилактических мероприятий.

Программный рабочий процесс и модульная структура

С точки зрения реализации предложенная методика была организована как последовательность пяти функциональных модулей: ввод данных, предварительная обработка, моделирование траектории, пространственный анализ риска и визуализация/формирование отчётов. Модуль ввода собирал данные из файлов, сенсорных систем, внешних баз данных и облачных сервисов. Модуль предварительной обработки проверял согласованность и подготавливал данные для численных расчётов. Модуль моделирования реализовывал детерминированные и стохастические модели траектории. GIS-модуль анализа выполнял пространственное наложение, зонирование опасности и вычисление показателей риска. Заключительный модуль формировал карты, графики и аналитические отчёты для конечных пользователей.

Такая модульная структура обеспечивает расширяемость системы и позволяет интегрировать её с внешними метеорологическими сервисами, цифровыми двойниками территорий, системами оповещения и платформами мониторинга. Кроме того, она повышает воспроизводимость, поскольку

каждый этап рабочего процесса может быть независимо проверен и обновлён.

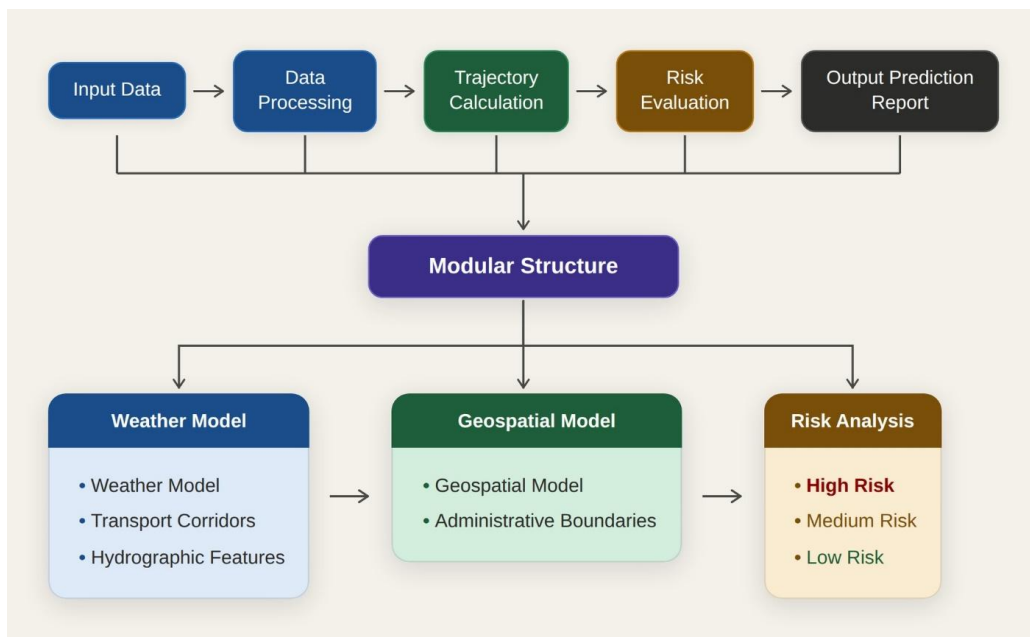


Рисунок 5 - Программная последовательность обработки данных и модульная структура системы прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя

На рисунке 5 представлена программная последовательность обработки данных и модульная структура системы прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. Верхняя часть схемы отражает основной рабочий процесс, включающий ввод данных, их обработку, расчёт траектории, оценку риска и формирование итогового прогностического отчёта. Нижняя часть показывает модульную организацию системы, в которой выделены отдельные блоки метеорологического моделирования, геопространственного анализа и оценки риска, взаимодействующие между собой в рамках единой вычислительной среды.

Сравнительная оценка моделей прогнозирования.

Для оценки эффективности предложенной схемы были сопоставлены три подхода к моделированию: классическая баллистическая модель, стохастическая модель на основе метода Монте-Карло и модель с элементами искусственного интеллекта и машинного обучения, используемая для адаптивного уточнения результатов прогноза. Сравнение проводилось для нескольких репрезентативных сценариев с различными значениями массы, скорости ветра и угла отделения.

Основными критериями оценки были средняя ошибка прогноза, стандартное отклонение ошибки и процент случаев, в которых прогнозируемая точка падения выходила за пределы безопасной зоны. Точечная ошибка прогноза определялась как

$$\Delta = \sqrt{[(x_{\text{pred}} - x_{\text{ref}})^2 + (y_{\text{pred}} - y_{\text{ref}})^2]}, \quad (11)$$

где $(x_{\text{pred}}, y_{\text{pred}})$ — прогнозируемые координаты точки падения, а $(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}})$ — эталонные координаты, полученные из базового сценария или наблюдательных данных. Этот показатель позволял выполнить прямое количественное сравнение точности прогнозирования для различных подходов.

Таким образом, предложенная методика объединяет физическую реализуемость, распространение неопределённости и территориальную интерпретацию результатов в рамках единой GIS-ориентированной схемы. Такая интеграция повышает практическую ценность модели для анализа безопасности запусков, поскольку поддерживает как точное прогнозирование траектории, так и содержательную оценку территориальных последствий.

Evaluation Criteria	Deterministic Model	Stochastic Model (Monte Carlo)	Hybrid Model	GIS Model
Prediction Accuracy	Medium	High	Very High	High
Uncertainty Consideration	Does Not Account	Accounts (Probabilistic)	Partially Accounts	Account (Spatial)
Computational Complexity	Low	Medium	High	Medium
Required Data	Basic Data	Statistical Distribution	Meteorological + Basic	Full GIS Data

Рисунок 6 - Сравнительная оценка моделей прогнозирования, используемых для определения зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя

На рисунке 6 представлена сравнительная оценка моделей прогнозирования, используемых для определения зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. В схеме сопоставлены детерминированная, стохастическая, гибридная и GIS-ориентированная модели по основным критериям, включая точность прогноза, учёт неопределённости, вычислительную сложность, требуемые данные и характер получаемого результата. Такое сравнение позволяет обосновать выбор наиболее эффективного подхода для практических задач прогнозирования и пространственной оценки риска.

На рисунке 7 представлена схема контроля качества данных, применяемая перед выполнением численного моделирования и пространственного анализа.

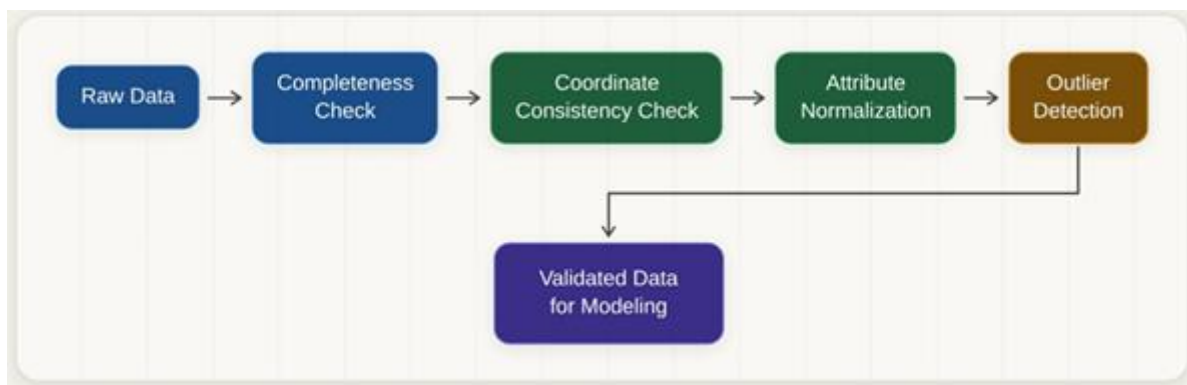


Рисунок 7 - Схема контроля качества данных, применяемая перед выполнением численного моделирования и пространственного анализа

Последовательность этапов включает проверку полноты данных, контроль согласованности координат, нормализацию атрибутов и выявление выбросов, после чего формируется верифицированный набор данных, пригодный для моделирования. Такая схема показывает, что достоверность прогноза зон падения в значительной степени зависит от качества и согласованности исходной информации.



Рисунок 8 - Схема формирования карты риска на основе последовательной обработки пространственных и аналитических данных

На рисунке 8 представлена схема формирования карты риска на основе последовательной обработки пространственных и аналитических данных. Вначале выполняются сбор и подготовка данных, затем проводится анализ угроз и оценка уязвимости территории, после чего осуществляется приоритизация и визуализация рисков. Итогом данного процесса является формирование карты риска, которая позволяет наглядно отобразить опасные зоны и использовать результаты для пространственного анализа и поддержки принятия решений.

На рисунке 10 представлена схема контура обновления прогноза в реальном времени. В ней показан циклический процесс, при котором новые данные поступают в систему, проходят этап анализа, используются для обновления модели, после чего формируется уточнённый прогноз. Такая структура отражает адаптивный принцип работы системы и позволяет

оперативно корректировать результаты прогнозирования при изменении внешних условий и поступлении новой информации.

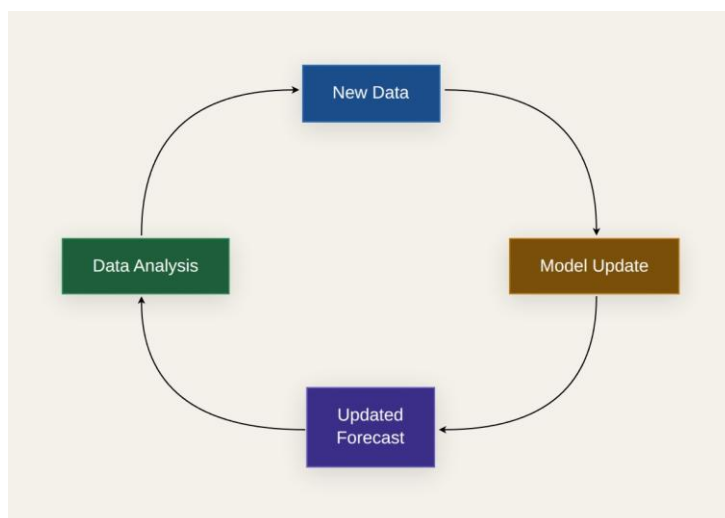


Рисунок 10 - Схема контура обновления прогноза в реальном времени

Результаты.

В работе приведены результаты математического моделирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя с применением интегрированной GIS-платформы. Проведённый анализ включал три варианта, отличающихся массой элемента, углом отделения и метеоусловиями. Для каждого случая определялись географические координаты точки падения, размер отклонения и характеристики потенциально опасной зоны. Полученные данные свидетельствуют, что при массе 850 кг, скорости ветра 5 м/с и угле 90° прогнозируемая точка падения — 52.471° с.ш. и 76.972° в.д., отклонение — 132 м. Во втором случае, при массе 820 кг, скорости ветра 8 м/с и угле 85° , точка падения оказалась на позиции 52.478° с.ш. и 76.964° в.д., отклонение составило минимальные 98 м. В третьем сценарии, при массе 870 кг, скорости ветра 4 м/с и угле 92° , координаты падения — 52.465° с.ш. и 76.977° в.д., отклонение — 142 м. Наиболее точным оказался второй вариант. Сравнение моделей показало, что современные подходы превосходят классическую баллистическую схему. Средняя ошибка классической модели — 220 м, стохастической модели Монте-Карло — 95 м, а модели с использованием искусственного интеллекта — 60 м. При этом вероятность выхода точки падения за пределы безопасной зоны упала с 12% до 1%, что подтверждает повышение достоверности и надёжности прогнозирования. Пространственный анализ риска выявил наибольшую уязвимость зоны С: плотность населения — 340 чел./км², вероятность падения — 3.7%, наличие критически важной инфраструктуры. Зона А характеризуется умеренным уровнем угрозы, зона В — наименее опасна из-за низкой плотности населения и отсутствия объектов жизнеобеспечения. Дополнительная оценка распределения затрат показала, что наибольший объём расходов приходится на этап обработки и анализа



данных — около 40%, визуализация — 25%, подготовка данных — 15%, ввод информации и оформление отчётов — по 10% каждый. В целом, совмещение детерминированного моделирования, стохастического анализа и оценки рисков через GIS позволяет повысить точность прогнозов, сузить радиус опасной зоны и обеспечить более обоснованный подход к защите населения и инфраструктуры.

Таблица 1 - Результаты сценарного моделирования зон падения

Сценарий	Масса ступени, кг	Скорость ветра, м/с	Угол отделения, °	Прогнозируемая широта, ° с.ш.	Прогнозируемая долгота, ° в.д.	Отклонение, м
1	850	5	90	52.471	76.972	132
2	820	8	85	52.478	76.964	98
3	870	4	92	52.465	76.977	142

Таблица 1 отражает результаты сценарного моделирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя при различных сочетаниях массы, скорости ветра и угла отделения. Установлено, что наименьшее отклонение прогнозируемой точки падения наблюдается во втором сценарии и составляет 98 м, тогда как в первом и третьем сценариях отклонение достигает 132 и 142 м соответственно. Это показывает, что изменение начальных параметров и метеорологических условий оказывает заметное влияние на точность прогноза и пространственное положение потенциально опасной зоны.

Таблица 2 - Сравнительная оценка моделей прогнозирования

Модель	Средняя ошибка, м	Стандартное отклонение, м	Выход за безопасную зону, %
Классическая баллистическая	220	65	12
Стохастическая (Монте-Карло)	95	40	4
AI/ML-модель	60	25	1

Таблица 2 демонстрирует сравнительную эффективность различных моделей прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. Классическая баллистическая модель характеризуется наибольшей средней ошибкой 220 м, стандартным отклонением 65 м и выходом за



безопасную зону в 12% случаев, что указывает на её сравнительно низкую точность. Стохастическая модель Монте-Карло обеспечивает заметное улучшение результатов, снижая среднюю ошибку до 95 м, а наиболее высокую точность показывает AI/ML-модель, для которой средняя ошибка составляет 60 м, стандартное отклонение — 25 м, а доля выхода за безопасную зону уменьшается до 1%.

Таблица 3 - Пространственная оценка риска по зонам

Зона	Плотность населения, чел./км ²	Вероятность падения, %	Критическая инфраструктура	Уровень риска
А	150	1.2	Да	Средний
В	30	0.2	Нет	Низкий
С	340	3.7	Да	Высокий

Таблица 3 отражает результаты пространственной оценки риска для различных территориальных зон с учётом плотности населения, вероятности падения и наличия критической инфраструктуры. Наиболее уязвимой является зона С, где при плотности населения 340 чел./км² и вероятности падения 3.7% уровень риска определяется как высокий. Зона А характеризуется средним уровнем риска, тогда как зона В, имеющая наименьшую плотность населения и минимальную вероятность падения, относится к зоне низкого риска.

Таблица 4 - Распределение вычислительных и организационных затрат

Этап	Доля затрат, %
Ввод данных	10
Предварительная обработка	15
Анализ данных и моделирование	40
Визуализация	25
Формирование итоговых отчётов	10

Таблица 4 показывает распределение вычислительных и организационных затрат между основными этапами работы системы прогнозирования. Наибольшая доля ресурсов приходится на этап анализа данных и моделирования, который составляет 40%, что подчёркивает его ключевую роль в формировании точного прогноза. Существенная часть затрат также связана с визуализацией результатов — 25%, тогда как ввод



данных и формирование итоговых отчётов требуют по 10%, а предварительная обработка занимает 15% общего объёма работ.

Таблица 5 - Обобщённая интерпретация полученных результатов

Показатель	Результат
Наименьшее отклонение	Сценарий 2, 98 м
Наибольшее отклонение	Сценарий 3, 142 м
Наиболее точная модель	AI/ML-модель
Наиболее уязвимая территория	Зона С
Основной ресурсоёмкий этап	Анализ данных и моделирование
Практический эффект	Снижение ошибки прогноза до 60 м и сокращение радиуса опасной зоны примерно на 25%

Таблица обобщает 5 ключевые результаты исследования и позволяет выделить наиболее значимые выводы по предложенной методике прогнозирования. Установлено, что наименьшее отклонение получено во втором сценарии и составляет 98 м, тогда как наибольшее отклонение наблюдается в третьем сценарии и достигает 142 м. Наиболее точной оказалась AI/ML-модель, а наиболее уязвимой территорией по совокупности факторов определена зона С. Кроме того, показано, что наиболее ресурсоёмким этапом является анализ данных и моделирование, а практический эффект применения методики выражается в снижении ошибки прогноза до 60 м и сокращении радиуса потенциально опасной зоны примерно на 25%.

На рисунке 11 показано изменение величины отклонения прогнозируемой точки падения по трём рассматриваемым сценариям. Минимальное значение отклонения наблюдается во втором сценарии и составляет около 98 м, тогда как в первом и третьем сценариях этот показатель возрастает до 132 и 142 м соответственно. Такая зависимость указывает на то, что второй сценарий обеспечивает наиболее благоприятные условия с точки зрения точности прогноза, тогда как первый и особенно третий сценарий сопровождаются большим пространственным разбросом результатов.

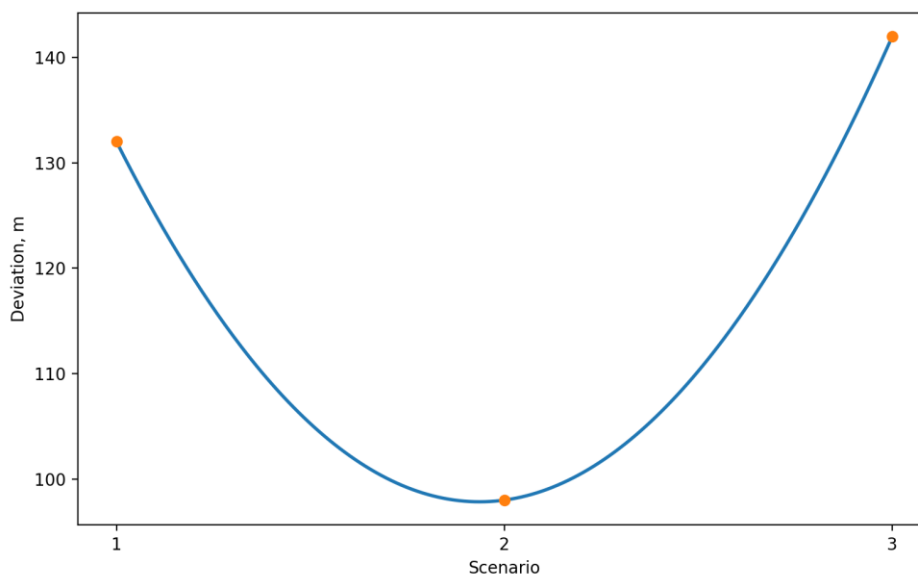


Рисунок 11 - Изменение величины отклонения прогнозируемой точки падения по трём рассматриваемым сценариям

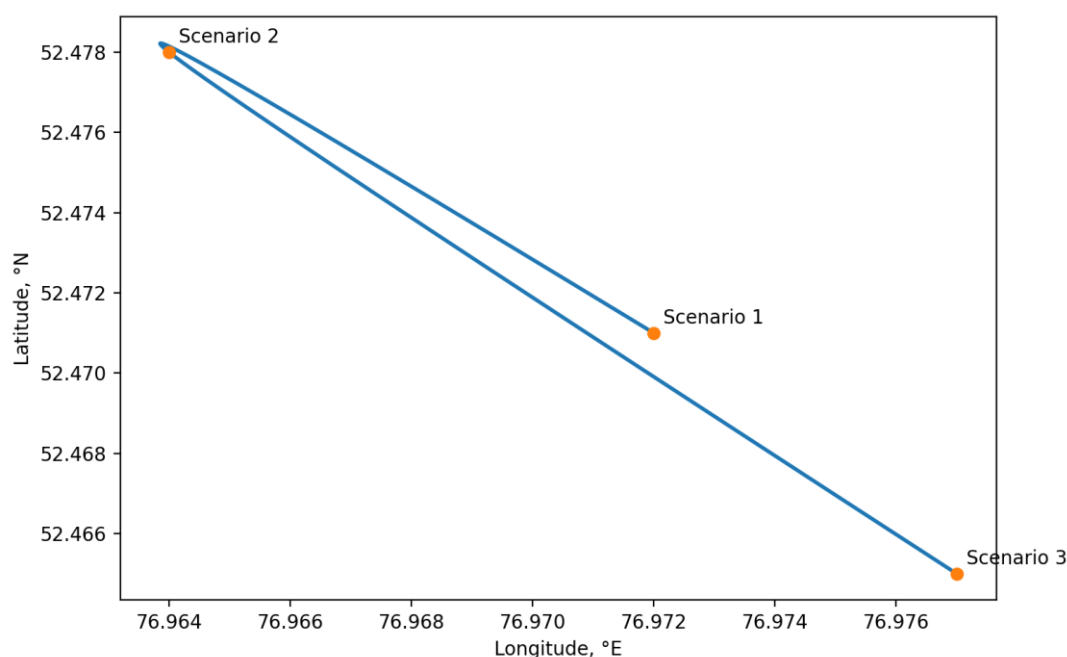


Рисунок 12 - Прогнозируемые координаты точек падения для трёх сценариев моделирования

На рисунке 12 представлены прогнозируемые координаты точек падения для трёх сценариев моделирования. Видно, что сценарий 2 соответствует наиболее северному положению точки падения, тогда как сценарий 3 расположен южнее остальных, а сценарий 1 занимает промежуточное положение. Такое распределение подтверждает, что изменение исходных параметров моделирования приводит к смещению точки падения в пространстве, что необходимо учитывать при построении карт риска и определении границ потенциально опасных зон.

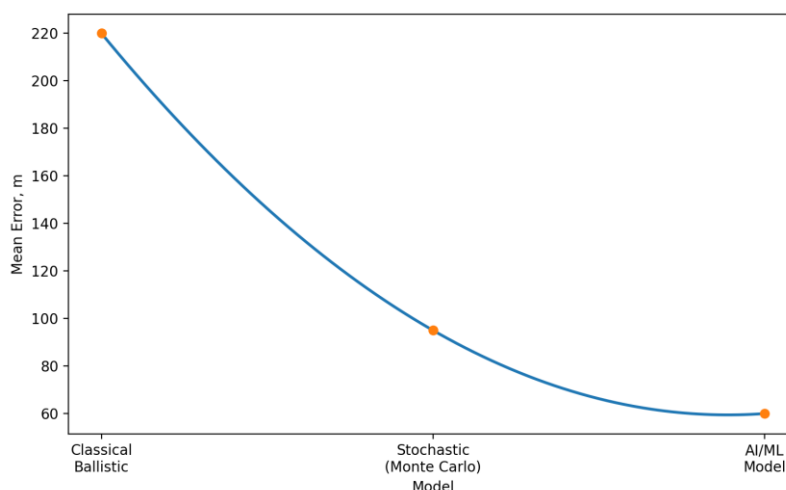


Рисунок 13 - Изменение средней ошибки прогнозирования для различных моделей

На рисунке 13 показано изменение средней ошибки прогнозирования для различных моделей. Наибольшее значение ошибки наблюдается у классической баллистической модели и составляет 220 м, тогда как стохастическая модель Монте-Карло снижает её до 95 м, а AI/ML-модель обеспечивает наилучший результат — около 60 м. Это свидетельствует о том, что применение современных вероятностных и интеллектуальных методов существенно повышает точность прогноза по сравнению с традиционным баллистическим подходом.

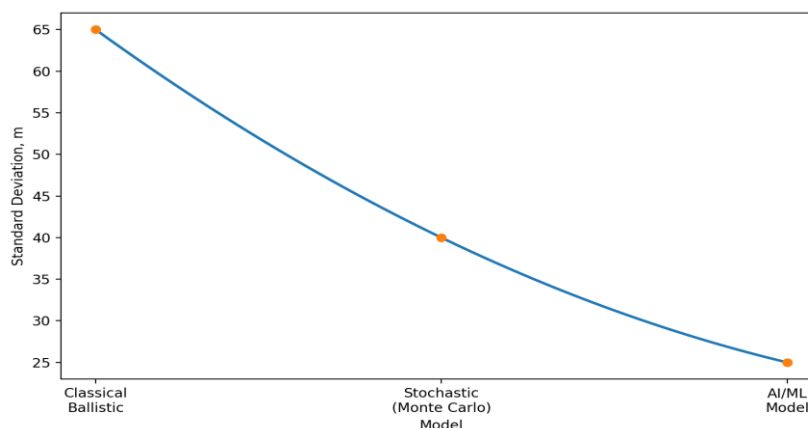


Рисунок 14 - Сравнение стандартного отклонения ошибки для трёх моделей прогнозирования

На рисунке 14 представлено сравнение стандартного отклонения ошибки для трёх моделей прогнозирования. Классическая баллистическая модель характеризуется наибольшим разбросом результатов — 65 м, тогда как для стохастической модели Монте-Карло этот показатель снижается до 40 м, а для AI/ML-модели достигает минимального значения 25 м. Это подтверждает, что современные методы не только повышают точность

прогноза, но и обеспечивают большую устойчивость и стабильность результатов моделирования.

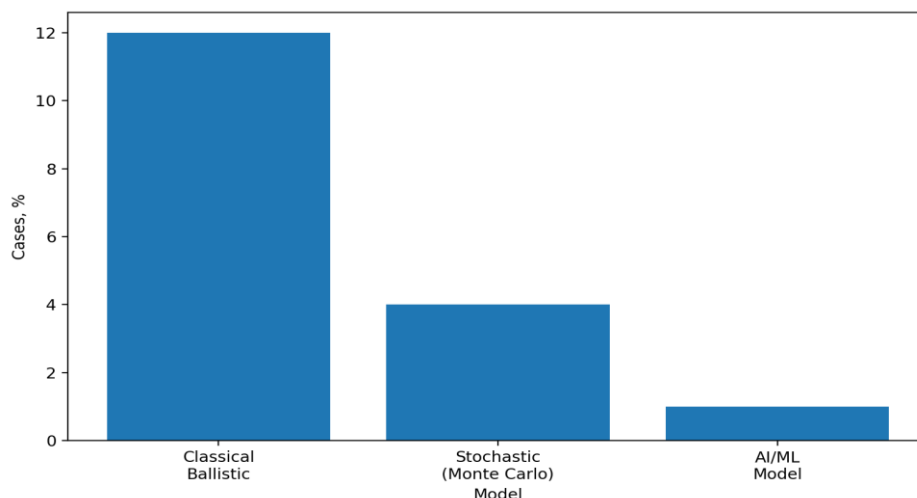


Рисунок 15 - Доля случаев, в которых прогнозируемая точка падения выходит за пределы безопасной зоны, для различных моделей

На рисунке 15 показана доля случаев, в которых прогнозируемая точка падения выходит за пределы безопасной зоны, для различных моделей. Максимальное значение наблюдается у классической баллистической модели и составляет 12%, тогда как для стохастической модели Монте-Карло этот показатель снижается до 4%, а для AI/ML-модели — до 1%. Полученные результаты подтверждают, что использование более совершенных методов моделирования значительно повышает надёжность прогноза и снижает вероятность ошибочного определения опасной зоны.

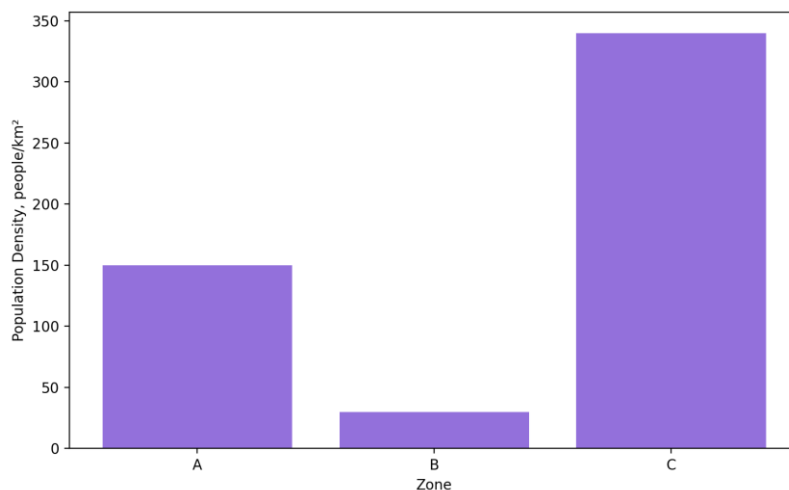


Рисунок 16 - Распределение плотности населения по рассматриваемым зонам риска

На рисунке 16 представлено распределение плотности населения по рассматриваемым зонам риска. Наибольшее значение наблюдается в зоне С и составляет около 340 чел./км², тогда как зона А характеризуется средней

плотностью населения 150 чел./км², а зона В — минимальной, около 30 чел./км². Это показывает, что зона С является наиболее чувствительной с точки зрения возможных последствий падения, поскольку высокая плотность населения усиливает потенциальный территориальный риск.

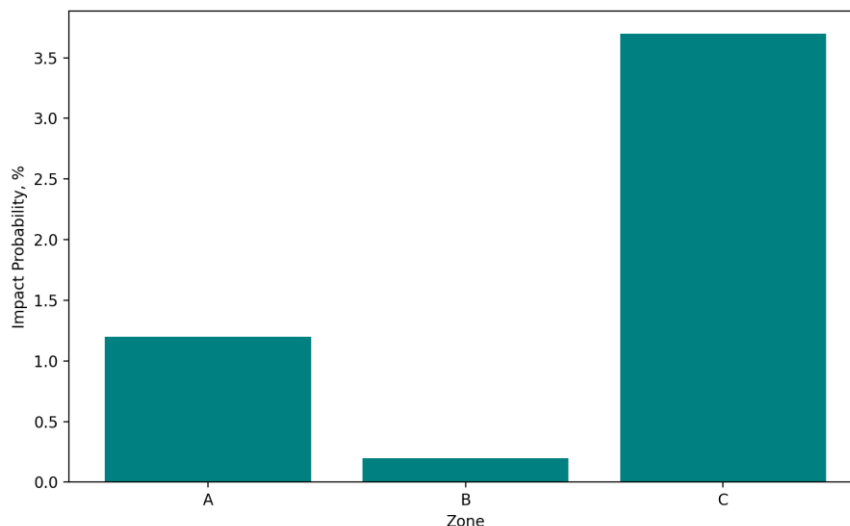


Рисунок 17 - Вероятность падения отделяющихся элементов в пределах рассматриваемых зон

На рисунке 17 представлена вероятность падения отделяющихся элементов в пределах рассматриваемых зон. Наибольшее значение зафиксировано для зоны С и составляет 3.7%, тогда как для зоны А вероятность падения равна 1.2%, а для зоны В — лишь 0.2%. Это подтверждает, что зона С является наиболее опасной не только по плотности населения, но и по вероятности возникновения самого события падения, что дополнительно усиливает её общий уровень риска.

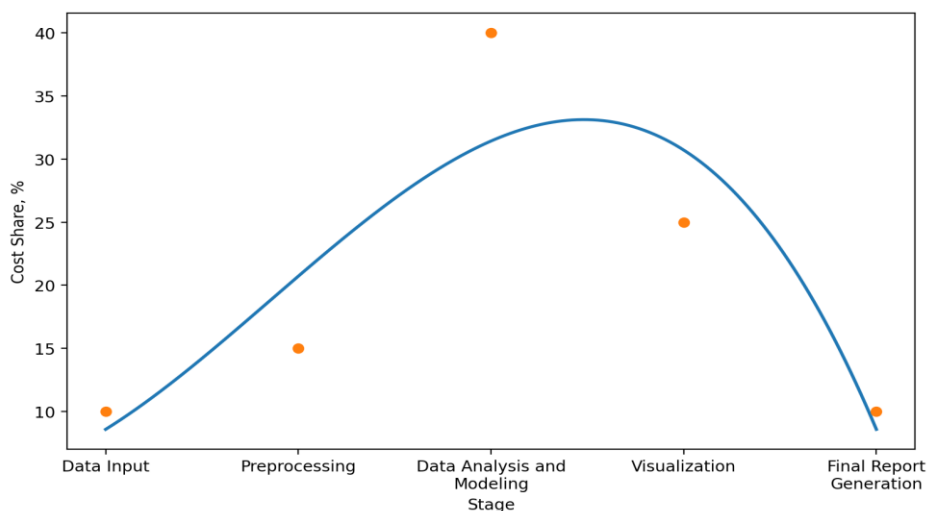


Рисунок 18 - Распределение доли затрат между основными этапами работы системы прогнозирования



На рисунке 18 показано распределение доли затрат между основными этапами работы системы прогнозирования. Наибольшая нагрузка приходится на этап анализа данных и моделирования, где затраты достигают 40%, тогда как визуализация занимает 25%, предварительная обработка — 15%, а ввод данных и формирование итогового отчёта составляют по 10%. Это указывает на то, что центральным и наиболее ресурсоёмким элементом всей системы является именно вычислительно-аналитический этап, определяющий качество итогового прогноза.

Заключение.

Разработана GIS-ориентированная методика прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя, объединяющая детерминированное моделирование траектории, стохастический анализ неопределённости и пространственную оценку риска. Показано, что изменение массы ступени, скорости ветра и угла отделения существенно влияет на координаты точки падения и величину отклонения, а наилучшие результаты демонстрирует AI/ML-модель, снизившая среднюю ошибку до 60 м и долю выхода за пределы безопасной зоны до 1%. Установлено, что наиболее уязвимыми являются территории с высокой плотностью населения и критической инфраструктурой. Таким образом, полученные результаты подтверждают, что интеграция траекторного моделирования, стохастического анализа и GIS-оценки риска повышает точность прогнозирования и практическую ценность системы для задач обеспечения безопасности космических запусков. Перспективы дальнейших исследований связаны с использованием данных в реальном времени, адаптивным обновлением параметров модели, расширением набора учитываемых факторов и интеграцией методики с цифровыми двойниками территорий, платформами мониторинга и системами раннего оповещения. Исследования проводились в рамках проекта ГФ ИРН АР23488291 ИИВТ КН МНВО РК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Juho Lee, Jae-Hung Han. (2025). Separation and Release Devices for Aeronautical and Astronautical Systems: A Review. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. Vol. 26, pp. 131–161.
2. Y. Xu, Z. Xie, F. Wang. (2021). Trajectory Analysis and Impact Prediction for Rocket Boosters. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. Vol. 44, No. 7, pp. 1278–1287.
3. F. Gan, C. Wu, J. Wang Yu. (2022). Liquid Launch Vehicle Safety Assessment Model Based on Semi-Quantitative Risk Analysis. *Mathematics*. Vol. 10, No. 24, 4772.
4. J. Acquatella, R. Reiner. (2014). Stage Separation Dynamics Modeling for End-to-End Launch Vehicle Trajectory Simulations. *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*, pp. 693–701.



5. J. Roshanian, M. Talebi. (2008). Monte Carlo simulation of stage separation dynamics of a multistage launch vehicle. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*. Vol. 29, no. 11, pp. 1411–1426,. doi: 10.1007/s10483-008-1103-z/
6. B.SR. G. Keanini, N. Srivastava, P. T. Tkacik. (2011). Stochastic Rocket Dynamics under Random Nozzle Side Loads. *Ann. Phys. (Berlin)* 523, N°. 6, pp. 459 – 487.
7. D. Luchinsky, V. Hafiychuk. I. Kulikov, V. Smelyanskiy, A. Patterson-Hine, J. Hanson, A. Hill. (2010). Stage Separation Failure: Model-Based Diagnostics and Prognostics. *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, pp. 1–12.
8. S. Wang, Y. Li, T. Ma.(2022). GIS-Based Risk Assessment for Rocket Debris Impact Zones. *Sensors*. Vol. 22, No. 3,820.
9. Z. Zhou, Q. Wang, H. Xu. (2023). Dynamic Modeling and Simulation of Multistage Rocket Separation. *Aerospace Science and Technology*, , Vol. 136, 107556
10. R. Wang, J. Zhou. (2021). Integrated GIS Modeling of Rocket Debris Dispersion. *Remote Sensing*, , Vol. 13, No. 8, Article 1555.
11. G. D. Katona, A. Kis. (2019). Adaptive Control and Trajectory Optimization for Multistage Rockets. *IFAC PapersOnLine*, , Vol. 52, No. 12, pp. 375–380.
12. T. Ishikawa, Y. Suzuki. (2020). Safety Analysis of Falling Rocket Debris using GIS and Monte Carlo Methods. *Safety Science*, , Vol. 130, Article 104880.
13. P. Zhang, X. Liu. (2022). Simulation of Separation Process and Falling Area Prediction for Rocket Boosters. *Aerospace Systems*. Vol. 5, No. 2, pp. 97–106.
14. R. Wang, J. Zhou. (2021). Integrated GIS Modeling of Rocket Debris Dispersion. *Remote Sensing*, , Vol. 13, No. 8, Article 1555.
15. Z. Wang, H. Xu. (2021). GIS-Based Dynamic Risk Modeling for Rocket Stage Debris Impact. *Geospatial Health*. Vol. 16, No. 2, pp. 119–128.
16. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 939–948.
17. A. Graser. (2016). *Learning QGIS. Third Edition: Explore and create interactive maps using the leading open-source GIS*. Packt Publishing, pp. 210.
18. Byers M., Wright E., Boley A. et al. (2022). Unnecessary Risks Created by Uncontrolled Rocket Reentries. *Nature Astronomy*, 6, 1093–1097.
19. J. Lee, H. Kim, E.J. Choi, J. Choi, J. Yu., J. Jo, J. Ahn. (2024). Review of Space Debris Modeling Methods and Development of Korean Space Debris Model. *Journal of Astronautical Space Sciences*, 41 (4), pp. 209–230.
20. A. Rao, G. Rondina. (2022). Open Access to Orbit and Runaway Space Debris Growth. Pp.84. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.07442>.
21. Slíz -Balogh J., Horváth D., Szabó R., Horváth G. (2020) . Dynamics of Spherical Space Debris of Different Sizes Falling to Earth. *Astrophysics*. Pp.1-16



22. Xu Y., Liu X., He R., Zhu Y., Zuo Y., He L. (2023). Active Debris Removal Mission Planning Method Based on Machine Learning. *Mathematics*, 11 (6):1419.
23. B. N. Pamadi, T. A. Neirynck, N. J. Hotchko, W. I. Scallion, K. J. Murphy, P. F. Covell. Simulation and Analyses of Stage Separation of Two-Stage Reusable Launch Vehicles. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, Vol. 44, No. 1, pp. 66–80. DOI: 10.2514/1.17896.
24. P. V. Tartabini, C. M. Roithmayr, M. D. Toniolo, B. N. Pamadi. (2011). Modeling Multibody Stage Separation Dynamics Using Constraint Force Equation Methodology. *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 48, No. 4, pp. 573–583. DOI: 10.2514/1.51943.
25. B. N. Pamadi, J. Pei, J. T. Pinier, S. D. Holland, G. H. Klopfer, P. F. Covell. (2012). Aerodynamic Analyses and Database Development for Ares I Vehicle First-Stage Separation. *Journal of Spacecraft and Rockets*, , Vol. 49, No. 5, pp. 864–874. DOI: 10.2514/1.59966.
26. B. N. Pamadi, P. V. Tartabini, M. D. Toniolo, C. M. Roithmayr, C. D. Karlgaard, J. A. Samareh. (2013). Application of Constraint Force Equation Methodology for Launch Vehicle Stage Separation. *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 50, No. 1, pp. 191–205. DOI: 10.2514/1.A32048.
27. J. M. Hanson, B. B. Beard. (2012). Applying Monte Carlo Simulation to Launch Vehicle Design and Requirements Verification. *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 49, No. 1, pp. 136–144. DOI: 10.2514/1.52910.
28. C. Pardini, L. Anselmo. (2018). Assessing the Risk and the Uncertainty Affecting the Uncontrolled Re-entry of Manmade Space Objects. *Journal of Space Safety Engineering*, , Vol. 5, No. 1, pp. 46–62. DOI: 10.1016/j.jsse.2018.01.003.
29. C. Pardini, L. Anselmo. (2019). Uncontrolled Re-entries of Spacecraft and Rocket Bodies: A Statistical Overview over the Last Decade. *Journal of Space Safety Engineering*. Vol. 6, No. 1, pp. 30–47. DOI: 10.1016/j.jsse.2019.02.001.
30. W. H. Ailor. (2019). Hazards of Reentry Disposal of Satellites from Large Constellations. *Journal of Space Safety Engineering*. Vol. 6, No. 2, pp. 113–121. DOI: 10.1016/j.jsse.2019.06.005.
31. C. Pardini, L. Anselmo. (2024). On the Need to Assess and Mitigate the Risk from Uncontrolled Re-entries of Artificial Space Objects in View of the Current and Future Developments in Space Activities. *Acta Astronautica*. Vol. 219, pp. 662–669. DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.03.057.
32. E. Wright, A. Boley, M. Byers. (2025). Airspace Closures Due to Reentering Space Objects. *Scientific Reports*. Vol. 15, Article 2966. DOI: 10.1038/s41598-024-84001-2.



Алия Калижанова, ф.-м.ғ.к., профессор, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Energo University, Алматы, Қазақстан, kalizhanova.aliya@gmail.com

Мурат Кунелбаев, PhD, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Farabi University, Алматы, Қазақстан, murat7508@yandex.kz

Серік Дәруіш, бағдарламашы, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Алматы, Қазақстан

ЗЫМЫРАН ТАСЫҒЫШТЫҢ БӨЛІНЕТІН САТЫЛАРЫНЫҢ ҚҰЛАУ АЙМАҚТАРЫН БОЛЖАУДЫҢ GIS-БАҒДАРЛАНҒАН ӘДІСТЕМЕСІН ӨЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Мақалада зымыран тасығыштың бөлінетін сатыларының құлау аймақтарын болжаудың траекторияны детерминирленген модельдеу, белгісіздікті стохастикалық талдау және тәуекелді кеңістіктік бағалау интеграциясына негізделген GIS-бағдарланған әдістемесі қарастырылады. Ұсынылған тәсіл сатылардың ұшу-техникалық параметрлерін, метеорологиялық деректерді және геокеңістіктік ақпаратты бірыңғай есептеу сызбасы аясында біріктіреді, бұл номиналды траекторияны есептеуді, құлау ықтимал аймағын қалыптастыруды және тәуекелдің цифрлық карталарын құруды қамтамасыз етеді.

Әдісті тексеру үшін сатылар массасы, жел жылдамдығы және бөліну бұрышы бойынша ерекшеленетін үш сценарий қарастырылды. Классикалық баллистикалық модель, Монте-Карло стохастикалық моделі және жасанды интеллект пен машиналық оқыту элементтері бар модель салыстырылды. Заманауи әдістерді қолдану болжамның орташа қатесін 60 м-ге дейін азайтуға, стандартты ауытқуды 25 м-ге дейін төмендетуге және қауіпсіз аймақтан тыс шығу үлесін 1%-ға дейін қысқартуға мүмкіндік беретіні көрсетілді.

Кеңістіктік тәуекел талдауы халық тығыздығы жоғары және маңызды инфрақұрылымы бар аумақтар ең осал екенін көрсетті. Алынған нәтижелер траекториялық модельдеуді, белгісіздікті талдауды және GIS-құралдарын біріктіру болжау дәлдігін және ғарыштық ұшырылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету кезінде шешім қабылдауды қолдау жүйесінің практикалық маңызын арттыратынын дәлелдейді.

Түйінді сөздер: зымыран тасығыш, бөлінетін саты, құлау аймақтарын болжау, GIS, стохастикалық модельдеу, тәуекелді кеңістіктік бағалау, Монте-Карло әдісі, AI/ML.



Aliya Kalizhanova, candidate of physico-mathematical sciences, professor, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Energo University, Almaty, Kazakhstan, kalizhanova.aliya@gmail.com

Murat Kunelbayev, PhD, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Farabi University, Almaty, Kazakhstan, murat7508@yandex.kz

Serik Daruish, programmer, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A GIS-BASED METHODOLOGY FOR PREDICTING THE IMPACT ZONES OF SEPARATING STAGES OF A LAUNCH VEHICLE

Abstract. This article discusses a GIS-based method for predicting the impact zones of launch vehicle separating stages based on the integration of deterministic trajectory modeling, stochastic uncertainty analysis, and spatial risk assessment. The proposed approach combines stage performance parameters, meteorological data, and geospatial information within a single computational framework that enables the calculation of a nominal trajectory, the generation of a probabilistic impact zone, and the construction of digital risk maps. To verify the approach, three scenarios were considered, differing in stage mass, wind speed, and separation angle. A comparison was made between a classical ballistic model, a stochastic Monte Carlo model, and a model with elements of artificial intelligence and machine learning. It is demonstrated that the use of modern methods allows for a reduction in the average prediction error to 60 m, a decrease in the standard deviation to 25 m, and a reduction in the percentage of overshoots to 1%. Spatial risk analysis revealed that the most vulnerable areas are those with high population density and critical infrastructure. The results confirm that the integration of trajectory modeling, uncertainty analysis, and GIS tools improves forecast accuracy and the practical value of the system for supporting decision-making in ensuring space launch safety.

Keywords: launch vehicle, separating stage, impact zone prediction, GIS, stochastic modeling, spatial risk assessment, Monte Carlo method, AI/ML.

Поступила: 09 апреля 2026 года

Рецензирована: 15 июня 2026 года

Принята: 18 июня 2026 года