

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего образования
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

На правах рукописи

Трундаев Иван Вячеславович

МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ
СОЗДАНИЕМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО
ФИНАНСИРОВАНИЯ РАБОТ В УСЛОВИЯХ
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

Гисин Владимир Борисович,
кандидат физико-математических наук, профессор

Москва – 2026

Диссертация представлена к публичному рассмотрению и защите в порядке, установленном ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» в соответствии с предоставленным правом самостоятельно присуждать ученые степени кандидата наук, ученые степени доктора наук согласно положениям пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике».

Публичное рассмотрение и защита диссертации состоится 8 сентября 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Финансового университета Д 505.001.126 по адресу: Москва, Ленинградский проспект, д. 51, корп. 1, аудитория 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном зале Библиотечно-информационного комплекса ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» по адресу: 125167, Москва, Ленинградский проспект, д. 49/2, комн. 100 и на официальном сайте Финансового университета в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: www.fa.ru.

Персональный состав диссертационного совета:

председатель – Шевцов В.А., д.техн.н., профессор;
заместитель председателя – Рябов П.Е., д.физ.-мат.н., доцент;
ученый секретарь – Прокопчина С.В., д.техн.н., профессор;

члены диссертационного совета:

Кочкаров А.А., д.техн.н., доцент;
Судаков В.А., д.техн.н., профессор;
Тимошенко А.В., д.техн.н., профессор;
Фархадов М.П., д.техн.н., с.н.с.

Автореферат диссертации разослан 22 июня 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Финансового университета Д 505.001.126

С.В. Прокопчина

I Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Современные радиолокационные станции (далее – РЛС) дальнего обнаружения (далее – ДО) являются сложными и высокотехнологичными системами. Такие системы являются крупными комплексами на основе модульного построения. Примером РЛС ДО является барьерно-сопровождающая РЛС (далее – РЛС-БС) для обеспечения безопасности космической деятельности.

Создание РЛС-БС непрерывной эксплуатации характеризуется длительными сроками. Разработка такой длительности проходит этапы жизненного цикла (далее – ЖЦ) разработки: проектирование, изготовление, испытания.

В современной экономике реализация любого этапа ЖЦ разработки РЛС-БС осуществляется в условиях фундаментальной неопределенности будущего. Это означает, что в процессе разработки могут возникать такие события, которые в момент начала проектирования вообще не могли существовать. Вероятностное понимание риска не в полной мере согласуется с данным типом неопределенности, что делает применение теоретико-вероятностных методов недостаточно обоснованным. Неопределенность связана с обращением внутри экономики «долгоживущих» активов, последствия использования которых могут проявляться спустя долгое время. Включение неопределенности в описание разработки крупных технических объектов является условием построения моделей взаимодействия субъектов в финансах и экономике.

Разработка РЛС становится нестабильной или хрупкой в условиях фундаментальной неопределенности (например, из-за уменьшения ликвидности балансов взаимодействующих сторон), что описывается теорией финансовой нестабильности. Одной из превентивных мер для снижения рисков при создании РЛС с требуемыми характеристиками в заданные сроки и в пределах финансирования может стать поддержка поступлений по проекту. Отсутствие поддержки крупных проектов, имеющих критическое оборонно-технологическое значение (как РЛС), может вызвать каскадный эффект в связанных отраслях промышленности.

Обоснование условий и критериев управления дополнительным финансированием крупных и критически важных проектов, таких как система информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве «Млечный путь», является стратегически важной научной задачей. Ее решение особенно важно для начальных и средних этапов ЖЦ разработки РЛС-БС, когда возмущающие факторы могут быть нейтрализованы. Запоздалый

мониторинг ключевых показателей и запаздывающее управление могут привести либо к срыву сроков, либо к нерациональному расходованию средств. Анализ процесса разработки, выявление негативных факторов и определение условий финансирования повышают эффективность использования средств и стабильность головного предприятия, отвечающего за разработку комплекса мониторинга космического пространства (далее – МКП).

Эффективность создания РЛС-БС прямо связана с экономической эффективностью использования изначально заложенных и дополнительных финансовых ресурсов, особенно в условиях жестких рамок тактико-технических характеристик (далее – ТТХ) и ограниченного бюджета. Создание РЛС ДО требует специальных методов оценки рисков и управления ходом разработки.

При разработке крупных РЛС возникают экономические и технические проблемы, без правильного учета которых невозможно адекватно учесть влияние неопределенности и оценить риски. Ошибки при оценке состояния разработки не позволяют своевременно и оперативно влиять на ход создания РЛС. Возникающие проблемы проявляются в возмущающих факторах, которые влияют на ключевые показатели разработки: инфляция, изменение ключевой ставки, нарушение логистических цепочек, внешнее экономическое давление, эндогенные факторы в экономике.

Вышеперечисленные особенности обуславливают создание математического аппарата, методики управления и программного комплекса для решения задач такого класса. Предлагаемые инструменты управления должны обеспечивать достижение целевых показателей ТТХ при разработке РЛС в условиях фундаментальной неопределенности.

Степень разработанности темы исследования. Модели разработки РЛС ДО и иных крупных долгосрочных проектов, методы управления разработкой комплексов РЛС и управления сложными техническими системами, их практические и теоретические аспекты были отображены в основных работах отечественных исследователей А.Л. Минца, М.М. Лобанова, Ю.Б. Кобзарева, П.К. Ощепкова. Их работы по праву считаются основополагающими для разработки РЛС ДО. Следующее поколение исследователей разрабатывает новые методы управления ходом разработки РЛС ДО: системное проектирование, организация ЖЦ разработки, методы оценки эффективности, управление рисками при создании РЛС ДО. Актуальные исследования освещаются в работах С.Ф. Боева, А.Ю. Шокина, А.В. Тимошенко, Г.Н. Мальцева, А.А. Рахманова, А.П. Линкевичиуса, А.С. Логовского, С.В. Игнатьева, В.И. Ширяева, А.Ю. Перлова, А.М. Казанцева, В.А. Панкратова, Р.С. Шафира, И.С. Ашуркова, А.А. Брагиной,

А.М. Ленихина, Н.А. Махутова, Н.П. Будко, О.В. Крюкова, Д.В. Левина, Н.А. Лешко, С.И. Макаренко, А.А. Мурашова.

Зарубежные исследования в области описания и организации процесса разработки крупных комплексов РЛС представлены работами M.I. Skolnik, J.M. Headrick, A. Farina, T. Thayaparan, B. Nuss, V. Bazin, J.P. Molinie, P. Dorey, M. Lesturgie, Y. Lu, H. Sun.

Данные подходы по отдельности содержат определенные недостатки. Возможные дополнения и направления совершенствования, выражающиеся в гибриде известных методов и в новых действиях при управлении, являются ключевыми для совершенствования теории управления разработкой крупных проектов в целом.

Цель исследования заключается в снижении рисков создания РЛС мониторинга космического пространства для успешного завершения разработки в соответствии с плановыми установками за счет внедрения адаптивной модели финансирования, основанной на оперативной оценке комплексного риска в условиях неопределенности.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих **задач**:

- 1) определение особенностей создания РЛС ДО, выявление недостатков существующих методов управления ходом разработки РЛС и выявление направлений совершенствования управления разработкой радиолокационных комплексов;
- 2) разработка математической модели создания РЛС-БС, позволяющей строить траектории процесса для оценки динамики технической готовности и бюджета, и обеспечивающей расчет комплексного показателя риска с учетом неопределенности исходных данных;
- 3) разработка методики управления созданием РЛС-БС на основе адаптивного финансирования, позволяющей формализовать оперативную корректировку денежных поступлений по результатам оценки комплексного риска;
- 4) сравнительный анализ разработанной методики управления и формирование практических рекомендаций по управлению разработкой комплекса РЛС-БС.

Объектом исследования выступает процесс создания радиолокационной станции в условиях неопределенности.

Предмет исследования – математические модели, методы и алгоритмы оценки рисков и адаптивного финансирования, обеспечивающие управление процессом разработки РЛС для достижения требуемых показателей в установленные сроки.

Информационную базу исследования составляют открытые данные от акционерного общества «Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца» (далее – НПОДАР) по компонентам РЛС-БС первой очереди

из пояснительной записки к составной части опытно-конструкторской работы (далее – ОКР) «АСПОС ОКП-2025 (АП МП)-НИИДАР РЛС-БС» (автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве, аванпроект «Млечный путь», научно-исследовательский институт дальней радиолокации), документ «РНКП.464421.002П37».

Область исследования диссертации соответствует п. 4. «Разработка новых математических методов и алгоритмов интерпретации натурного эксперимента на основе его математической модели»; п. 8. «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» Паспорта научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Научная новизна выносимых на защиту положений заключается в том, что:

1) Построена математическая модель разработки РЛС, отличающаяся от известных:

- процесс разработки описан в виде динамических траекторий, формируемых на основе дифференциальных уравнений с учетом неопределенности данных об изменении готовности компонентов РЛС и возможности адаптивного финансирования их разработки;
- параметры модели (коэффициент адаптации, оптимальная скорость разработки) определяются для различных этапов ЖЦ на основе технологических и ресурсных характеристик проекта.

Это позволяет описывать динамику технической готовности и бюджета разработки во времени и наглядно демонстрировать их изменение посредством фазовых и кинетических портретов, учитывать влияние возмущающих факторов, управляющих воздействий и изменение параметров разработки в зависимости от текущего этапа ЖЦ разработки.

2) Разработана методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ, отличающаяся от известных тем, что:

- процесс разработки представлен в виде динамических траекторий, формируемых на основе численного решения системы дифференциальных уравнений, при этом стохастические возмущения моделируются с использованием численных методов генерации случайных процессов;
- строится область допустимого риска, границы которой определяются на основании проектной (конструкторской) документации и директивно утвержденных допусков ключевых параметров проекта (ГОСТ, акты и требования ТЗ), а также с учетом динамики показателя риска;

- введен динамический комплексный показатель риска в процесс разработки РЛС;
- управляющие воздействия (моменты и объем финансирования) для поддержания траектории в допустимой области риска определяются с учетом текущей технической готовности с использованием аппарата нечеткой логики.

Методика контролирует развитие разработки в допустимой области, что позволяет снижать риски создания РЛС МКП для успешного завершения проекта в соответствии с плановыми установками и ресурсными и временными ограничениями.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что модель разработки позволяет строить фазовые и кинетические портреты состояния проекта РЛС-БС с учетом возмущающих факторов и управляющих воздействий, а методика адаптивного финансирования обеспечивает расчет оценки комплексного риска в условиях дефицита данных и фундаментальной неопределенности.

Практическая значимость работы подтверждается готовностью модели разработки РЛС и методики адаптивного финансирования к внедрению в процессы управления проектами РЛС ДО предприятиями оборонно-промышленного комплекса. Модель создания РЛС позволяет строить директивную траекторию разработки РЛС-БС на всех этапах ЖЦ и задает основу для вычисления рисков создания РЛС. Методика позволяет оценивать риски разработки РЛС при дефиците данных на основе: мягкой оценки отклонений ключевых показателей от плановых значений, правил определения границ области допустимых рисков, критериев необходимости и целесообразности дополнительного финансирования.

Методология и методы исследования основаны на исследованиях отечественных и зарубежных ученых в области управления созданием сложных технических систем, математического моделирования динамических процессов, теории рисков и управления в условиях фундаментальной неопределенности. Исследование основано на подходе, который объединяет методы математического моделирования, мягких вычислений и имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1) Разработана математическая модель создания РЛС, которая позволяет описывать динамику ключевых показателей проекта во времени и демонстрировать их изменение посредством фазовых и кинетических портретов, учитывать влияние возмущающих факторов и управляющих воздействий, изменение параметров разработки в зависимости от текущего этапа ЖЦ разработки (С. 34-63).

2) Описана методика управления созданием РЛС на основе адаптивного

финансирования работ, которая отличается от известных тем, что позволяет строить директивную (плановую) и фактическую траектории разработки, вычислять комплексный показатель риска (оценивающий состояние разработки в условиях фундаментальной неопределенности) и определять необходимость, целесообразность и объем соответствующих управляющих воздействий (С. 64-88).

Степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования.

Достоверность теоретических и практических результатов подтверждена численными экспериментами, докладами на научных конференциях, соответствующих направлению диссертационного исследования.

Результаты исследования представлены: на X Международной научно-практической конференции «Современная математика и концепции инновационного математического образования» (Москва, Финансовый университет, 21 июня 2023 г.); на XI Международной научно-практической конференции «Современная математика и концепции инновационного математического образования» (Москва, Финансовый университет, 19 июня 2024 г.); на IV Международной научно-практической конференции «Социально-экономическая траектория развития России: категорический императив бытия во времени и пространстве» (г. Тверь, Тверской государственный университет, 28-29 ноября 2024 г.); на XXXII Международной научной конференции «Математика. Компьютер. Образование» (г. Пущино, Пущинский научный центр биологических исследований Российской академии наук, 27-31 января 2025 г.); на XLIV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем» (г. Серпухов, Военная академия РВСН имени Петра Великого, 26-27 июня 2025 г.); на XXVI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы развития и применения средств ПВО с учетом опыта специальной военной операции. Средства ПВО России и других стран мира, их сравнительный анализ» (г. Ярославль, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны имени маршала Советского Союза Л.А. Говорова, 10 октября 2025 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Перспективы развития радиолокационных и информационных систем в интересах обеспечения Воздушно-космических сил Российской Федерации» (Москва, Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники, Научно-производственное объединение дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца, 20 ноября 2025 г.).

Результаты использованы Московским филиалом ООО «НРТК КАПС» в ходе разработки перспективных наземных робототехнических комплексов. Внедрение

результатов позволило формализовать процессы управления рисками при разработке, применить методiku адаптивного финансирования, снизить неопределенность при прогнозировании сроков выполнения ОКР. Использование результатов способствует своевременному завершению разработки в условиях жестких временных и ресурсных ограничений.

Результаты использованы в АО «НПОДАР имени академика А.Л. Минца» в ходе выполнения составной части ОКР «Автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве – 2025 в рамках аванпроекта «Млечный путь» – НИИДАР РЛС-БС». Модель разработки РЛС и методика управления созданием РЛС позволили на начальном этапе проектирования, сопряженного с высокой степенью неопределенности исходных данных, получить числовые оценки риска разработки различных вариантов технического облика РЛС-БС.

Материалы диссертации используются Кафедрой математики и анализа данных Факультета информационных технологий и анализа больших данных Финансового университета в преподавании учебных дисциплин «Цифровая математика на языке R и Excel» и «Математика» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 38.03.01 «Экономика».

Апробация и внедрение результатов исследования подтверждены соответствующими документами.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 6 научных работах общим объемом 6,75 п.л. (авторский объем – 5,51 п.л.), в том числе 3 работы общим объемом 3,06 п.л. (авторский объем – 2,41 п.л.) опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК при Минобрнауки России, а также 2 работы общим объемом 2,81 п.л. (авторский объем – 2,5 п.л.) опубликованы в изданиях, входящих в цитатно-аналитическую базу RSCI.

Структура и объем диссертации определяются поставленной целью, задачами и логикой исследования. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 79 наименований. Текст диссертации изложен на 147 страницах, содержит 3 таблицы, 27 рисунков и 80 формул.

II Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность и проанализирована разработанность темы исследования, поставлены цель и задачи, определены объект и предмет исследования,

задана область исследования, обоснована научная новизна исследования, определены рамки теоретической и практической значимости работы, выбраны методология и методы исследования, выделены положения, выносимые на защиту, показана степень достоверности, апробация и внедрение результатов исследования.

В **первой главе** проведен анализ особенностей создания РЛС ДО, требований по информационному обеспечению процесса управления созданием РЛС, существующих методов управления и обозначены направления совершенствования управления созданием РЛС.

На основе проведенного анализа сформулирована общая научная задача, решаемая в диссертации: разработать модель и методику управления созданием РЛС-БС, обеспечивающие оперативную оценку комплексного риска срыва сроков разработки для обоснования финансовых решений, направленных на успешное завершение разработки.

Общая постановка задачи выглядит следующим образом. Пусть есть некоторая область допустимых рисков $\Omega(t)$. Выход из нее траектории разработки РЛС будем считать негативным сигналом.

Тогда состояние разработки РЛС МКП в момент времени $t \in T$ можно описать кортежем (1)

$$X = \langle G, C(G), R \rangle, \quad (1)$$

где X – состояние разработки РЛС МКП;

$t \in T$ – время;

$G \in [0; 1]$ – текущее значение технической готовности отдельных компонентов РЛС МКП;

$C(G)$ – совокупный объем задействованных финансовых ресурсов (руб.);

R – комплексный показатель риска разработки.

Модель разработки РЛС задается как в виде системы (2)

$$M = \langle X(t), Q, \Xi, U, F \rangle, \quad (2)$$

где M – модель разработки РЛС МКП;

Q – набор проектных, производственных и испытательных параметров разработки на разных этапах ЖЦ;

Ξ – множество возмущающих факторов, влияющих на готовность во время разработки;

U – множество возможных управляющих финансовых воздействий;

F – множество отношений между элементами $X(t)$, Q , Ξ .

В диссертации рассматривается только управление дополнительным финансированием по результатам оценки рисков, которое косвенно влияет на остальные части общего управления. Требуется конкретизировать (определить связи, структуру и параметры) модель M . Модель должна учитывать особенности разработки РЛС-БС, создавать основу для определения оптимального или приемлемого объема управляющих финансовых воздействий U .

Введем комбинированный функционал (3)

$$J(u) = \alpha R_M + \beta \frac{1}{h(G(T), C(0), \sum_{i=1}^n u_i)}, \quad (3)$$

где $J(u)$ – функционал совокупного риска и эффективности;

$u \in U$ – вектор дополнительного финансирования, представляющий собой набор из n платежей;

α – положительная константа влияния риска;

R_M – суммарный показатель комплексного риска, рассчитанный посредством модели (4);

β – положительная константа влияния эффективности;

$h(G(T), C(0), \sum_{i=1}^n u_i)$ – эффективность использования дополнительных вложений $h \in [0; 1]$;

$T \in R^+$ – длительность разработки;

$C(0)$ – начальный бюджет;

n – количество дополнительных выплат для поддержания проекта (финансовых траншей);

u_i – объём i -го дополнительного финансирования;

i – индекс дополнительного финансирования.

Необходимо найти оптимальное управление (4)

$$u^* = \operatorname{argmin}(J(u)). \quad (4)$$

Поиск управления осуществляется при ограничениях на готовность, финансирование и эффективность дополнительных вложений (5) - (7)

$$G(T) = 1, \quad (5)$$

$$u^* \leq u_{\text{допуст}}, \quad (6)$$

$$h \leq h_{\text{допуст}}, \quad (7)$$

где $u_{\text{допуст}}$ – допустимый объем дополнительных финансовых вложений;

$h_{\text{допуст}}$ – допустимая эффективность дополнительных вложений (защита от нерационального вливания средств).

Во **второй главе** разработана оригинальная математическая модель, в которой процесс разработки РЛС представлен в виде траектории динамической системы в пространстве состояний «техническая готовность компонентов РЛС – бюджет – время». Уравнения, описывающие динамическую систему, содержат компоненты, позволяющие учесть неопределенность данных об изменении готовности компонентов РЛС и возможность адаптивного финансирования.

Для корректной постановки вышеуказанных задач при неполной и изменяющейся во времени информации в процесс разработки РЛС приняты следующие допущения:

- 1) Наибольший уровень неопределенности характерен для первого этапа жизненного цикла создания РЛС (этап проектирования).
- 2) На ранних этапах изменение готовности происходит медленно.
- 3) По мере накопления данных о технической готовности РЛС неопределенность снижается, что приводит к снижению риска разработки (уменьшаются математическое ожидание и дисперсия ущерба).
- 4) По мере накопления данных изменение готовности асимптотически стремится к некоторому значению, характеризующему полное выполнение требований и задач процесса разработки РЛС и ее компонентов.
- 5) Дополнительное финансирование снижает риски лишь до определенного предела, превышение этого предела не компенсирует технологические ограничения или

ошибки проектирования (закон убывающей отдачи).

б) Существует возможность выделения дополнительных финансовых средств для устранения ошибок, допущенных при проектировании и/или изготовлении компонентов РЛС.

Перечисленные допущения носят качественный характер и описывают причинно-следственные связи между основными сущностями процесса «неопределенность – риск», «финансирование/ресурсы – темп готовности» и «ограничения – насыщение». Такие допущения позволяют задать рамки и требования для математической формализации динамической управляемой модели, способной отразить эволюцию, нелинейность и управляемость системы.

Моделирование процесса разработки РЛС на всех этапах ЖЦ опишем в виде системы дифференциальных уравнений (8), включающей схему финансирования, смену значений параметров на этапах ЖЦ и начальные условия

$$\begin{cases} \ddot{G}(t) = a \left(1 - \frac{1}{b} \dot{G}(t) \right) \dot{G}(t) - \varepsilon(t) + c (C(G(t)) + u(t)) \\ C(G(t)) = \begin{cases} C_0, G \in [0; G_0) \\ C_n, G \in [G_{n-1}; 1) \\ 0, G = 1 \end{cases} \\ \dot{G}(0) = g(C(0)) \\ G(0) = G_{\text{нач}} \end{cases}, \quad (8)$$

где $\ddot{G}(t)$ – темп изменения скорости готовности (характеризует, как быстро сама скорость работ $\dot{G}(t)$ увеличивается или уменьшается под влиянием выделенных ресурсов, накопленной информации и внешних возмущающих факторов);

a – коэффициент адаптации;

b – оптимальная скорость разработки;

$\dot{G}(t)$ – скорость изменения технической готовности в момент времени t ;

$\varepsilon(t)$ – возмущающие факторы, влияющие на готовность компонентов РЛС во время их разработки;

c – коэффициент преобразования финансовых ресурсов в скорость изменения готовности (1 / (рубль × ед. время));

$C(G(t))$ – совокупный объем задействованных в разработке финансовых ресурсов (руб.);

$G(t)$ – текущие уровни технической готовности отдельных компонентов РЛС
($G(t) \in [0; 1]$);

$u(t)$ – дополнительные (управляемые) финансовые средства, выделенные на ликвидацию неучтенных задержек и расходов;

$g(C(G(0)))$ – выбор начальной скорости изменения готовности в зависимости от размера авансового платежа;

$G_{\text{нач}}$ – начальная готовность отдельных компонентов РЛС.

В формуле (9) задается функция начальных условий

$$g(C(G(0))) = c \frac{C(G(0))}{C_{\text{max}}} b. \quad (9)$$

Для каждого этапа рассчитаны значения a и b . На этапе проектирования оптимальная скорость проектирования b задается формулой (10)

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{фс}}} Y_i N_{\text{констр}} F_{\text{раб}}}{N_{\text{фс}} \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{фс}}} T_{\text{норм}j}}{N_{\text{фс}}}}, \quad (10)$$

где $N_{\text{фс}}$ – количество функциональных систем;

Y_i – унификация i -й функциональной системы (от 0 до 1);

i – номер функциональной системы;

$N_{\text{констр}}$ – количество конструкторов и разработчиков;

$F_{\text{раб}}$ – полезное среднее общее время на проект (на одну ставку конкретно на данную разработку);

$T_{\text{норм}j}$ – нормативная трудоемкость проектирования одной функциональной системы.

Определим коэффициент адаптации a (11), полагая

$$a = \begin{cases} ka_1, & \text{если } \dot{G}(t) \in [0; b] \\ ka_2, & \text{если } \dot{G}(t) \in [b; \infty) \end{cases}, \quad (11)$$

где a_1 – скорость проектной деятельности;
 a_2 – штраф за перегрузку персонала;
 k – масштабирующий коэффициент.

Определим скорость проектной деятельности a_1 формулой (12) и штраф за перегрузку a_2 формулой (13)

$$a_1 = \frac{b}{T_{\text{пр}}}, \quad (12)$$

где $T_{\text{пр}}$ – продолжительность этапа проектирования.

$$a_2 = \frac{N_{\text{фс}}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{фс}}} Y_i}. \quad (13)$$

На этапе изготовления оптимальная загрузка производственных линий b представлена формулой (14)

$$b = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^N F_{\text{линии}}}{t_{\text{шт}}}, \frac{\sum_{i=1}^n k_{\text{ПГ}i}}{n} V_{\text{max}} \right), \quad (14)$$

где N – количество производственных линий под разработку;
 i – индекс производственной линии;
 $F_{\text{линии}}$ – доступное время работы одной линии i в месяц (ч.);
 $t_{\text{шт}}$ – время изготовления одного блока (ч.);
 n – это количество компонентов, по которым усредняется показатель готовности;
 j – индекс структурного компонента;
 $k_{\text{ПГ}j}$ – коэффициент технологической готовности производств, необходимых для изготовления структурного компонента [10], при этом $k_{\text{ПГ}j} \in [0; 1]$;
 V_{max} – максимум производства (при отсутствии ограничений по готовности технологий, комплектующих и кадров).

Зададим коэффициент адаптации по формуле (11), где a_1 – коэффициент гибкости

производства, a_2 – штраф за перегрузку производства, k – эмпирически масштабирующий коэффициент. Зададим коэффициент гибкости производства a_1 формулой (15)

$$a_1 = \frac{b}{T_{\text{из}}}, \quad (15)$$

где $T_{\text{из}}$ – продолжительность этапа изготовления.

Коэффициент a_2 – это обратная величина средней готовности в формуле (16)

$$a_2 = \frac{1}{\overline{k_{\text{ПГ}}}}, \quad (16)$$

где $\overline{k_{\text{ПГ}}}$ – средний коэффициент производственной готовности по всем компонентам (средняя готовность технологий и мощностей для производства модулей).

На этапе испытаний определим технологический потолок испытаний b формулой (17)

$$b = \frac{N_{\text{стенд}} F_{\text{стенда}}}{t_{\text{цикл}}}, \quad (17)$$

где $N_{\text{стенд}}$ – количество испытательных стендов;

$F_{\text{стенда}}$ – полезное общее время стенда;

$t_{\text{цикл}}$ – длительность цикла испытаний.

Определим коэффициент адаптации по формуле (11), где a_1 – коэффициент оперативности испытательного цикла, a_2 – штраф за процедуру испытаний, k – эмпирически масштабирующий коэффициент.

Зададим коэффициент гибкости производства a_1 формулой (18)

$$a_1 = \frac{b}{T_{\text{ис}}}, \quad (18)$$

где $T_{\text{ис}}$ – продолжительность этапа испытаний.

Зададим штраф за процедуру испытаний a_2 формулой (19)

$$a_2 = \frac{t_{\text{цикл}}}{t_{\text{анализа}}}, \quad (19)$$

где $t_{\text{анализа}}$ – время анализа результатов одного цикла испытаний.

Введены показатели риска, отражающие меру отклонения фактических частных показателей: по готовности $R_r(t)$, календарному графику $R_k(t)$ и бюджету $R_b(t)$ разработки РЛС от плановых значений в текущий момент времени.

Риск готовности $R_r(t)$ определяется формулой (20)

$$R_r(t) = \max\left(0; \frac{G_n(t) - G_\phi(t)}{G_n(t)}\right), \quad (20)$$

где $G_n(t)$ – плановая техническая готовность;

$G_\phi(t)$ – фактическая техническая готовность.

Аналогично определяется календарный риск $R_{kl}(t)$ формулой (21)

$$R_{kl}(t) = \max\left(0; \frac{T_\phi(t) - T_n(t)}{T - T_n(t)}\right) d, \quad (21)$$

где $T_\phi(t)$ – затраченное на текущую готовность время;

$T_n(t)$ – плановое время на текущую готовность;

d – экспертный коэффициент влияния календарного риска на общий.

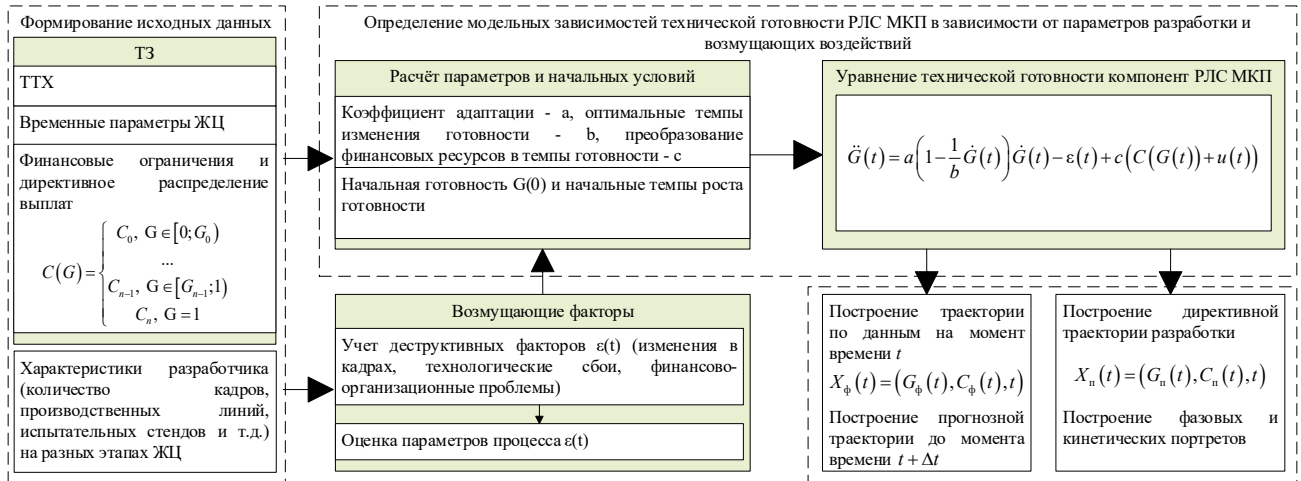
Наконец, определим бюджетный риск формулой (22)

$$R_b(t) = \begin{cases} \max\left(0; \frac{C_n(t) - C_\phi(t)}{C_n(t)} + \frac{G_n(t) - G_\phi(t)}{G_n(t)}\right), & C_n(t) \neq 0 \\ \max\left(0; \frac{G_n(t) - G_\phi(t)}{G_n(t)}\right), & C_n(t) = 0 \end{cases}, \quad (22)$$

где $C_{\phi}(t)$ – фактическое значение бюджета;

$C_{\pi}(t)$ – планируемое значение бюджета.

Структура модели представлена на рисунке 1.



Источник: составлено автором.

Рисунок 1 – Структурно-логическая схема модели разработки РЛС

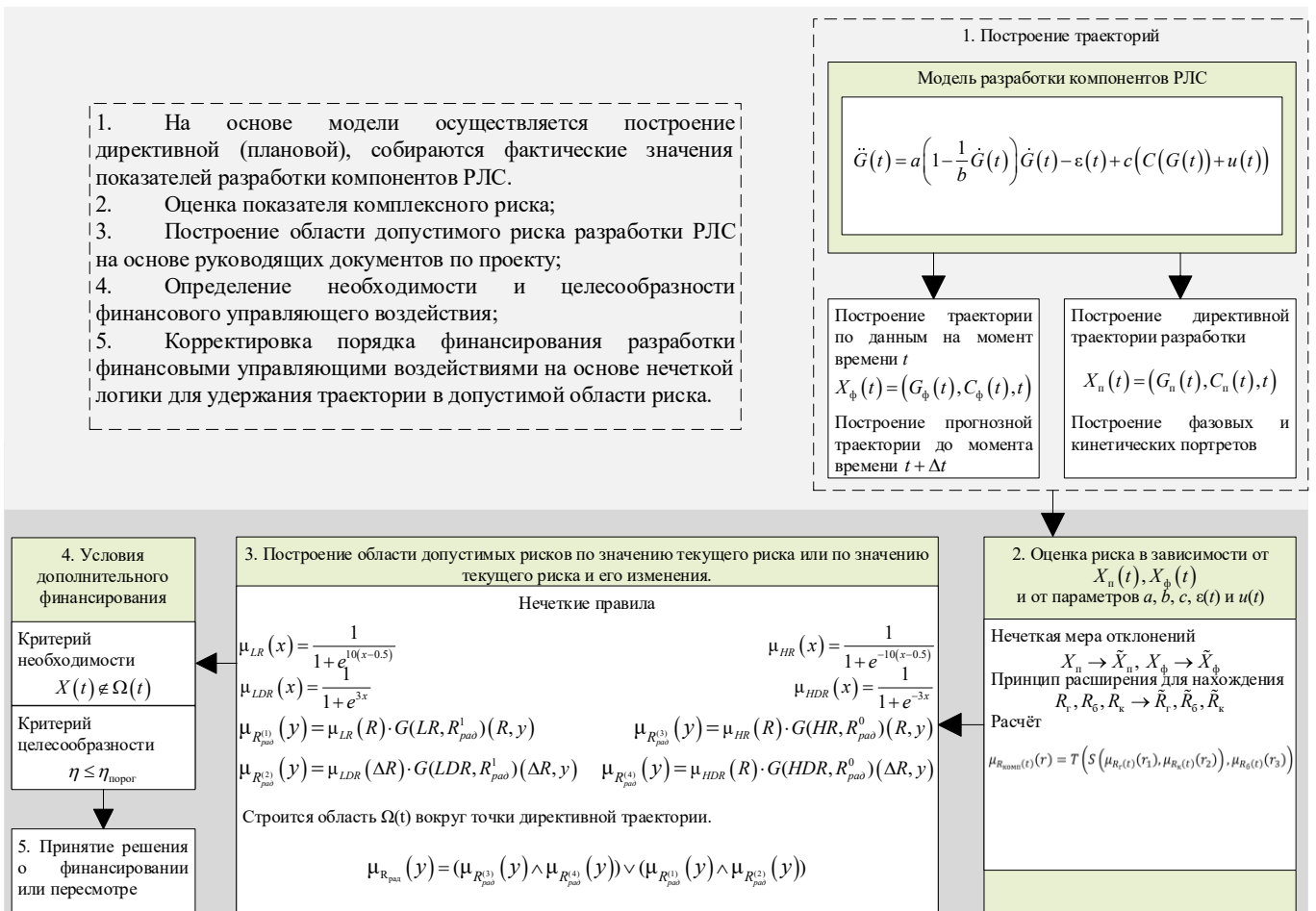
В третьей главе представлена методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ, в которой на основе построения динамической траектории хода разработки РЛС производится оценка комплексного риска и формирование адаптивных финансовых воздействий. Следование этой методике позволяет удерживать траекторию в области допустимого риска и, таким образом, обеспечивать на заданном уровне эффективность процесса разработки РЛС.

Для контроля состояния хода разработки РЛС по нескольким параметрам используется область допустимого риска, в которой множество допустимых состояний системы формируется в пространстве «техническая готовность компонентов РЛС – бюджет – время».

Классическая схема финансирования ОКР предусматривает фиксированный аванс и жесткую привязку выделения средств к этапам выполнения работ.

В диссертации рассматривается адаптивное финансирование как дополнение к базовому контрактному порядку. Непосредственно в контракте фиксируются основные выплаты за выполненные этапы, а дополнительное финансирование определяется по результатам оценки комплексного риска по принципу обратной связи. Это позволяет своевременно компенсировать отклонения, не нарушая контрактных обязательств, и предотвращает накопление рисков и срыв сроков.

Момент и объем финансирования становятся функцией от траектории движения проекта в пространстве возможных состояний. В общей структуре управления проектом предполагается введение новых функциональных операций: построение траектории разработки РЛС в фазовом пространстве, формирование области допустимого риска, оценка комплексного риска разработки РЛС и адаптация параметров финансирования к текущему состоянию. Эти операции дополняют традиционный научно-методический аппарат. Основные операции методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ представлены на рисунке 2.



Источник: составлено автором.

Рисунок 2 – Структурно-логическая схема модели разработки РЛС

Действия методики:

1) *Определение связи технических и финансовых параметров, оценка параметров возмущающих воздействий. Построение директивной (плановой) и фактической траекторий разработки компонентов РЛС. Комплексный риск определяется ключевыми параметрами проекта (2). Для его оценки процесс создания РЛС представлен непрерывной траекторией в пространстве состояний проекта, описывающей эволюцию технической*

готовности и бюджета под действием управляющих решений и возмущений. Директивная (плановая) траектория $X_{\Pi}(t)$ строится на основе модели, а фактическая $X_{\Phi}(t)$ соответствует реальным измерениям. Начальное состояние $X(0) = (G(0), C(0))$ задается известными значениями готовности компонентов и бюджета. Траектория $X(t) = (G(t), C(t))$ получается численным решением системы (8), отображая переход от исходного состояния к целевому (завершение разработки) с учетом ресурсных ограничений и стохастических воздействий.

2) *Оценка показателя комплексного риска.* На основе $X_{\Pi}(t)$ и $X_{\Phi}(t)$ рассчитываются частные риски: по готовности $R_{\Gamma}(t)$, календарному графику $R_{\kappa}(t)$ и бюджету $R_{\delta}(t)$. Для интеграции этих разнородных показателей в условиях неопределенности применяется аппарат нечеткой логики. На первом этапе выполняется фаззификация – преобразование точных значений входных показателей в нечеткие числа с использованием гауссовых функций принадлежности.

Это позволяет снизить чувствительность оценки риска к кратковременным возмущениям. Затем по принципу обобщения Л. Заде вычисляются нечеткие значения частных рисков $\mu_{R_{\Gamma}}(r_{\Gamma})$, $\mu_{R_{\kappa}}(r_{\kappa})$, $\mu_{R_{\delta}}(r_{\delta})$.

После чего формируется нечеткое множество комплексного риска (23)

$$\mu_{R_{\text{комп}}(t)}(r) = T \left(S \left(\mu_{R_{\Gamma}(t)}(r_1), \mu_{R_{\kappa}(t)}(r_2) \right), \mu_{R_{\delta}(t)}(r_3) \right), \quad (23)$$

где S – t -конорма (обобщенное объединение);

T – t -норма (обобщенное пересечение).

Дефаззификация методом центра тяжести дает итоговую скалярную оценку комплексного риска на каждом шаге моделирования. Полученное значение служит основой для мониторинга и принятия решений об адаптивном финансировании.

3) *Построение области допустимого риска $\Omega(t)$ разработки РЛС на основе руководящих документов по проекту в пространстве параметров (G, C, t) .* В отличие от традиционного интервального задания допусков на каждый параметр в отдельности, предложенный подход учитывает корреляцию между технической готовностью и бюджетом. Он позволяет динамически изменять границы области по мере выполнения проекта: на начальных этапах область шире (высокая неопределенность), к завершению сужается. Размер области определяется на основе нечетких правил вывода, учитывающих текущее значение комплексного риска $R(t)$ и его динамику $\Delta R(t)$. Правила применяются к

вербальным переменным.

Выход фактической траектории за пределы $\Omega(t)$ служит сигналом для проверки критерия целесообразности дополнительного финансирования.

4) *Определение необходимости и целесообразности финансового управляющего воздействия.* Принятие решений об адаптивном финансировании основывается на двух последовательно применяемых критериях. Критерий необходимости фиксирует выход фактической траектории за пределы области допустимого риска, что сигнализирует о возникновении угрозы срыва разработки и требует рассмотрения вопроса о выделении дополнительных средств. Критерий целесообразности оценивает экономическую оправданность вмешательства Δu : дополнительные вложения признаются целесообразными, если предельная эффективность инвестиций η не превышает критического порога $\eta_{\text{крит}}$. Предельная эффективность инвестиций определяется по формуле (24)

$$\eta = \frac{\Delta R}{\Delta u}. \quad (24)$$

Механизм адаптивного финансирования активируется только при одновременном выполнении обоих критериев, когда траектория вышла из допустимой области и возврат в нее экономически оправдан. Такой подход обеспечивает рациональное использование ресурсов в долгосрочной разработке РЛС-БС.

5) *Корректировка порядка финансирования разработки финансовыми управляющими воздействиями для удержания траектории в допустимой области риска.*

В диссертации описаны и проанализированы два подхода к адаптивному управлению. Как только траектория разработки покидает область допустимого риска, инициируется выделение заранее фиксированного объема средств (константы). Такой способ прост в реализации, однако не учитывает ни величину отклонения, ни динамику процесса, что может приводить либо к избыточному, либо к недостаточному финансированию. При альтернативном подходе правила, которые ранее использовались для определения радиуса области, теперь применяются для непосредственного вычисления объема финансирования. Структура правил сохраняется, но заключением становится не геометрический параметр области, а лингвистическая переменная «объем дополнительных средств». Срабатывание правил происходит автоматически при фиксации выхода траектории из допустимой области, а итоговое значение финансирования получается путем дефаззификации. Это

позволяет гибко реагировать на степень и скорость отклонения, связывая величину управляющего воздействия с текущей рискованной обстановкой.

В четвертой главе проводится численный эксперимент по проверке эффективности разработанной методики. Для проведения исследования эффективности предложенной методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования, а также для верификации адекватности разработанных моделей был разработан специализированный программно-аппаратный комплекс (далее – ПАК). ПАК разработан в средах разработки Microsoft Visual Studio и Unity3D на языке C#.

Целью вычислительного эксперимента является исследование эффективности методики управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ. Эффективность разработанной методики демонстрируется путем сравнения динамики разработки в типовых проблемных ситуациях при использовании традиционного подхода (без адаптивного управления) и при применении разработанной методики.

Для проведения эксперимента смоделированы два сценария развития разработки блоков РЛС, отражающих типовые риски крупных проектов.

Сценарий А. Начальные параметры проекта оказались близки к фактическим, но под влиянием внутренних или внешних возмущающих воздействий траектория процесса создания блока РЛС в некоторый момент времени выходит за границы области допустимого риска. При традиционном подходе к управлению, не предусматривающем адаптивного финансирования работ, данное отклонение не компенсируется. Предлагаемая методика, в отличие от простого увеличения или уменьшения финансирования, включает проверку критериев необходимости и целесообразности – деньги выделяются только тогда, когда расчет показывает, что сравнительно небольшая сумма действительно возвращает проект в допустимые рамки, не поощряя затягивание работ и не допуская нерациональных трат. Это приводит к неконтролируемому росту рисков, срыву установленных сроков разработки и, как следствие, к недостижению целевых показателей проекта.

Сценарий Б. Фактические параметры процесса разработки на стартовых этапах оказываются существенно ниже плановых (траектория процесса изначально проходит ниже прогнозируемой области допустимых значений). К тому же ситуация характеризуется существенным уровнем неопределенности из-за недооценки возмущающих факторов. В отсутствие оперативных корректирующих воздействий, предусмотренных методикой адаптивного финансирования, такое отставание имеет тенденцию к накоплению (эффект инерционности процесса разработки), что в конечном итоге также ведет к срыву директивных сроков и невозможности выполнения целевых показателей.

Рассмотрим таблицы с результатами по наиболее сложному для разработчиков сценарию Б.

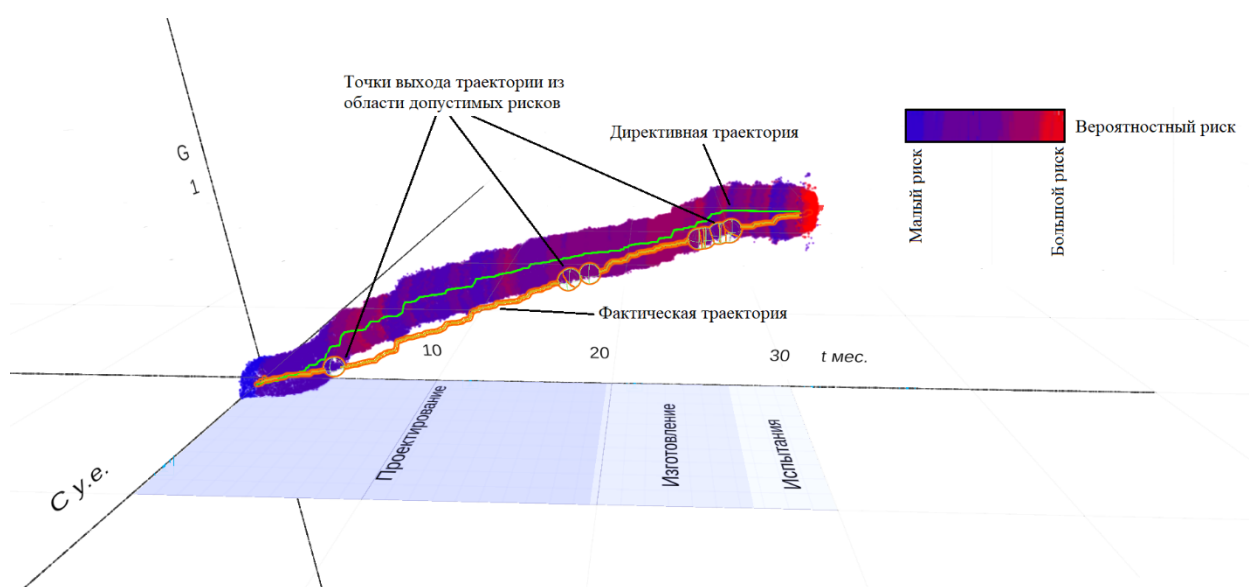
Для краткости будем называть построение области на основе вероятностной оценки рисков – алгоритм А1, построение области на основе фактических отклонений – алгоритм А2, построение области на основе нечеткой оценки отклонений – алгоритм А3, построение области на основе нечеткой оценки отклонений с управлением – алгоритм А4.

В сценарии Б (таблица 1) целевой показатель технической готовности ($G = 1$) достигнут только при использовании алгоритма А4. Это алгоритм адаптивного финансирования на основе нечеткой оценки риска. Варианты без управления (А1, А2, А3) не вышли на требуемый уровень готовности. Они зафиксировали значение $G = 0,95$. Поведение алгоритма А1 показано на рисунке 3.

Таблица 1 – Результаты эксперимента в сценарии Б

Показатели эффективности	Без управления			С управлением
	Алгоритм А1	Алгоритм А2	Алгоритм А3	Алгоритм А4
Время вне области допустимых рисков (мес.)	14,86	17,2	22,85	15,58
Количество выходов из области (шт.)	11	4	5	4
Объем дополнительного финансирования (у.е.)	0	0	0	0,0779
Достижение целевых показателей ($G = 1$)	Нет. $G = 0,95$	Нет. $G = 0,95$	Нет. $G = 0,95$	Да. $G = 1$
Эффективность использования выделенного бюджета	0,95	0,95	0,95	0,9277

Источник: составлено автором



Источник: составлено автором посредством разработанного ПАК в среде разработки Unity3D.
Рисунок 3 – Оценка риска на основе вероятностного подхода

На рисунке 3 видно, что при сильной неопределенности, используя вероятностный подход, не удастся построить удовлетворительный прогноз и оценить риск. Причина в том, что в уникальных проектах данных для определения параметров распределений недостаточно, а использование некорректных гипотез приводит к ошибочным прогнозам. Сама же модель учитывает подобные эффекты дискретных управленческих издержек за счет логистического насыщения и параметров, что при превышении оптимальной скорости разработки резко снижает отдачу от дополнительного финансирования, прямо отражая закон Брукса.

Подход, основанный на фактических отклонениях, тоже оказывается неэффективным. Этот подход чрезмерно чувствителен к кратковременным случайным скачкам показателей, из-за чего возникают частые ложные срабатывания или, наоборот, запаздывание реакции.

В результате ни тот, ни другой подход не позволяют своевременно вернуть траекторию в допустимую зону и проект завершается с недостижением целевой готовности. Устойчивое управление обеспечивает нечеткая оценка риска, учитывающая динамику накопления информации и сглаживающая шумы.

В базовых вариантах (без управления) наблюдается потеря контроля. Плановые оценки параметров не полностью совпадают с фактическими, интенсивность возмущений повышена. Траектория выходит за границы области допустимого риска с начальных этапов и не возвращается. Время пребывания вне области допустимых рисков составляет от 14,86 до 22,85 месяца. Проект не завершается в директивные сроки.

Применение адаптивного финансирования (алгоритм А4) позволяет частично компенсировать высокую волатильность. Несмотря на отдельные выходы за границы области риска (суммарно 15,58 месяца), механизм оперативного реагирования возвращает траекторию в допустимые пределы.

Количество таких выходов не превышает четырех. Накопление критических отклонений предотвращается.

Проект выходит на финальный показатель готовности $G = 1$. Совокупные затраты на адаптивное финансирование составили 0,0779 у.е. Это цена работы в условиях сильной неопределенности.

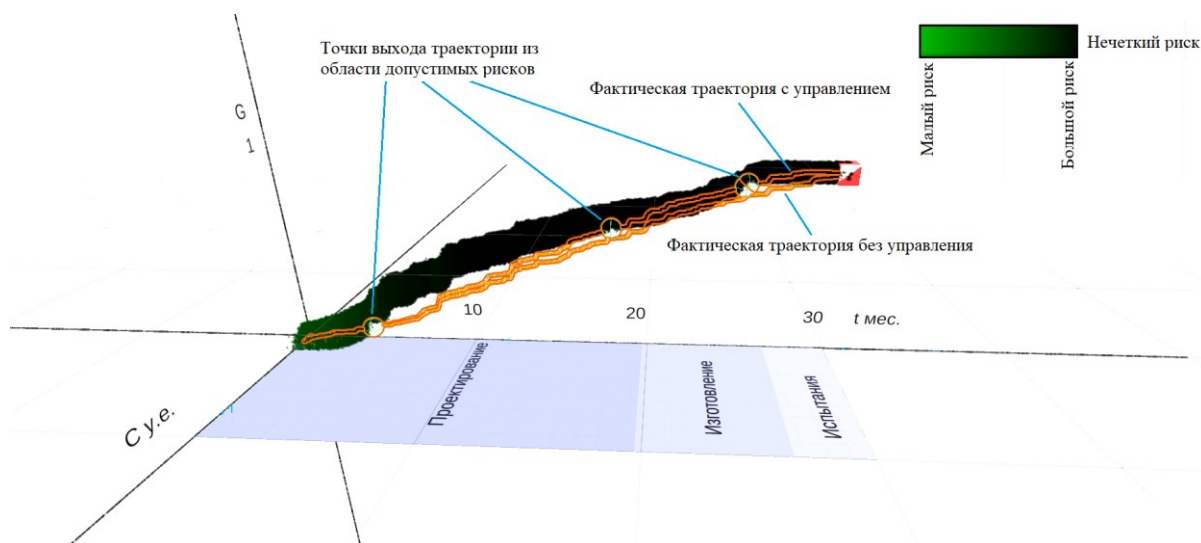
В таблице 2 представлено сравнение различных конфигураций алгоритма управления. В том числе анализируется оптимизация порогов срабатывания. Тем самым проводится анализ изменения показателей эффективности при изменении выделяемых средств и при выполнении критериев необходимости и целесообразности финансирования.

Таблица 2 – Результаты эксперимента в сценарии Б

Показатели эффективности	Алгоритм А4			
	$u = 0,15$	$u = 0,1$	$u = 0,05$	$u = 0,01$
Время вне области допустимых рисков (мес.)	15,58	18,05	20,16	22,08
Количество выходов из области (шт.)	4	3	2	5
Объем дополнительного финансирования (у.е.)	0,0779	0,0602	0,0336	0,0074
Достижение целевых показателей ($G = 1$)	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$	Да. $G = 1$
Эффективность использования выделенного бюджета	0,9277	0,943248	0,9674	0,9926

Источник: составлено автором

Во всех вариантах целевой показатель технической готовности достигнут. Разработка завершилась с $G = 1$. Значит, методика адаптивного финансирования позволяет оптимизировать управляющие воздействия. В условиях высокой неопределенности необходимо брать управляющие воздействия с некоторым запасом, так как управляющие воздействия $u = 0,01$, которые успешны в одном случае, могут быть бесполезны в другом. Рекомендованное значение зависит от оценки неопределенности, порогового значения предельных инвестиций и доступных средств. Реализация управления представлена на рисунке 4. Цель диссертации по снижению рисков достигнута: в наиболее сложном сценарии Б применение разработанной методики позволило сократить время пребывания проекта в критической зоне риска с 22,85 до 15,58 месяца и обеспечить достижение 100% технической готовности ($G = 1$) против 95% без адаптивного финансирования.



Источник: составлено автором посредством разработанного ПАК в среде разработки Unity3D.
Рисунок 4 – График моделируемой фактической траектории разработки с управлением на основе нечеткой оценки рисков.

На рисунке 4 сферы показывают точки принятия решения о финансировании при выходе из области допустимых рисков.

На основе полученных результатов в конце главы 4 рассмотрено применение разработанной методики для конкретного проекта СЧ ОКР: «АСПОС ОКП-2025» (АП МП)-НИИДАР РЛС-БС». Рассчитаны показатели на основе данных аванпроекта, построена директивная траектория.

III Заключение

В рамках проведенного исследования разработаны модель разработки РЛС и методика управления созданием РЛС на основе адаптивного финансирования работ, обеспечивающие в условиях неопределенности и ограниченности ресурсов достижение целевых показателей разработки РЛС-БС. Модель учитывает особенности и специфику разработки РЛС: различные этапы ЖЦ, изменение параметров возмущающих факторов во времени, учет управляющих воздействий, нелинейных свойств и иных особенностей. В рамках методики определен комплексный показатель риска на основе мягких вычислений, что позволяет адекватно оценивать состояние разработки в условиях сильной неопределенности. Определены правила, которые позволяют строить область допустимых рисков с динамически меняющимися границами на основе текущих значений риска и его динамики. Определены и заданы критерии необходимости и целесообразности финансирования, а также определен аппарат для вычисления объема дополнительных субсидий. Поставленная цель диссертации достигнута, задачи решены.

IV Список работ, опубликованных по теме диссертации

*Публикации в рецензируемых научных изданиях,
определенных ВАК при Минобрнауки России:*

1. Трундаев, И.В. Моделирование траекторного движения к цели в условиях неопределенности / И.В. Трундаев // Нелинейный мир. – 2024. – № 4. Том 22. – С. 70-79. – ISSN 2070-0970.

2. Трундаев, И.В. Мягкое управление нелинейной экономической системой / И.В. Трундаев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2025. – № 1 (53). – С. 84-100. – ISSN 2227-8486.

3. Трундаев, И.В. Система поддержки принятия решения диспетчера ситуационного центра при аварийных изменениях уровня энергопотребления на основе метода сглаживания / А.С. Захаров, Д.А. Шарипов, И.В. Трундаев [и др.] // Динамика сложных систем - XXI век. – 2025. – № 5. Том 19. – С. 69-78. – ISSN 1999-7493.

*Публикации в научных изданиях, входящих
в цитатно-аналитическую базу RSCI:*

4. Трундаев, И.В. Формализация процесса разработки бортовой радиолокационной станции фазовой траекторией в допустимой области значений с учетом неопределенности данных о технической готовности ее компонентов и порядке финансирования / И.В. Трундаев, В.А. Панкратов, С.П. Соляникова, С.С. Михайлова // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2025. – № 4. – С. 164-175. – ISSN 0579-2975.

5. Трундаев, И.В. Модель финансирования разработки информационно-управляющих систем на основе многокритериального анализа данных / И.В. Трундаев, В.Б. Гисин, А.В. Тимошенко, В.А. Панкратов // Финансы: теория и практика / Finance: Theory and Practice. – 2026. – № 1. Том 30. – С. 93-102. – ISSN 2587-5671.

Публикации в других научных изданиях:

6. Трундаев, И.В. Методика оценки рисков при разработке радиолокационной станции мониторинга космического пространства на основе адаптивного финансового управления / И.В. Трундаев, В.В. Харитонов, В.А. Панкратов // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. – 2026. – № 1. – С. 59-65. – ISSN 2410-4124.