

ОРЛОВ С.А.,

к.м.н., ФГБНУ «Национальный научно-исследовательский институт общественного здоровья им. Н.А. Семашко», г. Москва, Россия, e-mail: orlovsergio@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5227-0657

КАРПОВ О.Э.,

д.м.н., профессор, академик РАН, ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, г. Москва, Россия, e-mail: nmhc_director@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5227-0657

АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ И АРХИТЕКТУРА ПРОТОТИПА ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В МЕДИЦИНСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ БИОЛОГИЧЕСКИХ, ТЕХНОГЕННЫХ И ГЕОПОЛИТИЧЕСКИХ ВЫЗОВОВ

DOI: 10.25881/18110193_2026_2_80

Аннотация. В статье рассматривается алгоритм разработки и архитектура прототипа информационно-аналитической системы поддержки принятия управленческих решений (ИАС ППУР), интегрирующей данные о сети медицинских организаций, их ресурсах и потоках пациентов. Система предназначена для функционирования как в плановом режиме, так и в условиях чрезвычайных ситуаций, обеспечивая прогнозирование, оптимизацию распределения ресурсов и координацию действий между структурными подразделениями и медицинскими организациями. Разработка прототипа ИАС ППУР проведена на основе модульного подхода с использованием сервисно-ориентированной архитектуры. При разработке применены геоинформационные сервисы, современные языки программирования, фреймворки, аналитические библиотеки и инструменты визуализации. Архитектура включает геоинформационный модуль для отображения и анализа медицинской инфраструктуры, BPMN-редактор бизнес-процессов, модуль имитационного и оптимизационного моделирования, калькуляторы расчета интегральных индексов устойчивости, а также средства формирования отчетности, мониторинга ключевых показателей эффективности (KPI), управления запасами ресурсов и информационной безопасности.

Реализованный прототип ИАС ППУР объединяет более десяти взаимосвязанных микросервисов, что обеспечивает гибкость, масштабируемость и возможность интеграции с внешними информационными и аналитическими системами. Работоспособность архитектурного подхода верифицирована методом функционального тестирования на синтетических наборах данных, моделирующих сценарии биологических, техногенных и геополитических угроз. Комплексная интеграция геоинформационных технологий, моделирования бизнес-процессов, аналитики и средств оптимизации позволяет повысить готовность медицинских организаций к реагированию на чрезвычайные ситуации, минимизировать последствия внешних угроз и сократить время принятия решений. Предложенная архитектура может послужить основой для дальнейшего развития региональных систем поддержки принятия управленческих решений в здравоохранении, повышая устойчивость системы и эффективность ее функционирования в условиях глобальных вызовов.

Ключевые слова: вызовы, информационно-аналитическая система, медицинская организация, моделирование, принятие управленческих решений, ресурсы.

Для цитирования: Орлов С.А., Карпов О.Э. Алгоритм разработки и архитектура прототипа информационно-аналитической системы поддержки принятия управленческих решений в медицинской организации при работе в условиях биологических, техногенных и геополитических вызовов. Врач и информационные технологии. 2026; 2: 80-98. DOI: 10.25881/18110193_2026_2_80.

ORLOV S.A.,

PhD, N. A. Semashko National Research Institute of Public Health, Moscow, Russia,
e-mail: orlovsergio@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5227-0657

KARPOV O.E.,

DSc, Professor, Academician of the Russian Academy of Science, Pirogov National Medical
and Surgical Center, Moscow, Russia, e-mail: nmhc_director@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5227-0657

ALGORITHM FOR THE DEVELOPMENT AND ARCHITECTURE OF A PROTOTYPE INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM FOR SUPPORTING MANAGEMENT DECISIONS IN A MEDICAL ORGANIZATION OPERATING UNDER BIOLOGICAL, TECHNOLOGICAL, AND GEOPOLITICAL CHALLENGES

DOI: 10.25881/18110193_2026_2_80

Abstract. *The article examines the development algorithm and architecture of a prototype information-analytical decision support system (IADSS) integrating data on a network of medical organizations, their resources, and patient flows. The system is designed to operate both in routine mode and in emergency situations, providing forecasting, optimization of resource allocation, and coordination between departments and medical organizations.*

The IADSS prototype was developed using a modular approach and a service-oriented architecture. Geoinformation services, modern programming languages, frameworks, analytical libraries, and visualization tools were used in the development. The architecture includes a geoinformation module for displaying and analyzing medical infrastructure, a BPMN business process editor, a simulation and optimization modeling module, calculators for computing integral sustainability indices, as well as tools for reporting, monitoring key performance indicators (KPI), managing resource inventories and information security.

The implemented IADSS prototype combines more than ten interconnected microservices, ensuring flexibility, scalability, and the ability to integrate with external information and analytical systems. The viability of the architectural approach was verified through functional testing on synthetic datasets simulating biological, technogenic (man-made), and geopolitical threats scenarios. The comprehensive integration of geoinformation technologies, business process modeling, analytics, and optimization tools improves the preparedness of healthcare organizations to respond to emergencies, minimizes the impact of external threats, and reduces decision-making time. The proposed architecture can serve as the basis for the further development of regional decision support systems in healthcare, enhancing the system's resilience and operational efficiency in the face of global challenges.

Keywords: *challenges, information-analytical system, medical organization, modeling, decision-making, resources.*

For citation: Orlov S.A., Karpov O.E., Algorithm for the development and architecture of a prototype information-analytical system for supporting management decisions in a medical organization operating under biological, technological, and geopolitical challenges. Medical doctor and information technology. 2026; 2: 80-98. DOI: 10.25881/18110193_2026_2_80.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с ежегодно возрастающими рисками биологических, техногенных и геополитических угроз медицинским организациям всех форм собственности и ведомственной принадлежности необходимо обеспечивать более эффективное управление имеющимися в их распоряжении ресурсами и быть готовыми к различным сценариям функционирования в условиях неопределенности. В подобных обстоятельствах информационно-аналитические системы поддержки принятия управленческих решений (ИАС ППУР) становятся ключевым инструментом для руководителей и специалистов в области организации здравоохранения. Такие системы позволяют обрабатывать огромные потоки данных в режиме реального времени, обеспечивать ситуационную осведомленность и формировать научно обоснованные рекомендации как для повседневного планирования, так и для экстренного реагирования в критических ситуациях [1, 2]. Необходимы современные ИАС ППУР, способные интегрировать различные источники данных и использовать передовые методы аналитики, позволяющие медицинским организациям прогнозировать появление новых угроз, оптимизировать распределение ресурсов и координировать действия между различными структурными подразделениями и друг с другом [3]. Международные и российские практики демонстрируют разнообразие архитектур и функциональных возможностей таких систем.

Геоинформационные системы (ГИС) активно применяются для поддержки принятия решений при чрезвычайных ситуациях (ЧС) [4, 5]. Например, в Греции, Болгарии, Албании, Македонии и Турции уже более 20 лет используется ГИС-платформа GEPIMI, включающая в себя ГИС, веб-базы данных, GPS, технологию смарт-карт и поддерживающая различные веб-приложения в сфере здравоохранения, в том числе раннее предупреждение и реагирование на эпидемии, удаленное управление медицинскими картами, бесперебойное медицинское обслуживание, комплексный статистический анализ данных, алгоритмы и процедуры принятия решений [6]. Данная платформа обеспечивает ситуационную осведомленность и адаптированные интерфейсы для различных ролей пользователей (операторы колл-центров, диспетчеры, бригады скорой

помощи, администраторы), тем самым повышая эффективность реагирования. Интеграция ГИС-технологий в ИАС ППУР позволяет визуализировать медицинские организации и их ресурсы на карте, отслеживать распространение происшествий и планировать маршруты, что критически важно при распределении и управлении потоками пациентов.

Мультиагентные системы поддержки принятия решений разрабатываются для координации реагирования на ЧС посредством интеллектуального взаимодействия агентов, позволяя выявлять различные типы угроз и вырабатывать варианты возможного реагирования на них [7].

Сервис-ориентированная архитектура (Service-oriented Architecture, SOA) зарекомендовала себя как эффективный подход к интеграции медицинских информационных систем и ресурсов [8]. Одним из ранних примеров может являться система SANDS (Service-oriented Architecture for National Decision Support), интегрирующая клинические системы в модули поддержки принятия решений со стандартизованными интерфейсами основных сервисов [9]. Данное решение позволяет объединять распределенные клинические данные пациентов, хранящиеся в разных медицинских организациях, и обеспечивать обмен знаниями для поддержки принятия решений на национальном уровне. Использование SOA с едиными протоколами упрощает интеграцию ИАС ППУР с уже существующей ИТ-инфраструктурой здравоохранения и между разными медицинскими организациями [10]. За последние пять лет SOA в здравоохранении эволюционировала в сторону облачно-нативных микросервисных архитектур на базе HL7 FHIR (Health Level 7 — Fast Healthcare Interoperability Resources), упростив подключаемость внешних модулей поддержки принятия решений, прежде всего клинических, к разным источникам данных и снизив связанность компонентов систем [11, 12].

Байесовские модели в поддержке решений получили развитие во время пандемии COVID-19. В ответ на кризис были созданы многокритериальные системы на основе байесовских сетей, оценивающие эффективность стратегий противодействия пандемии с учетом множества факторов [13, 14]. Такие системы позволяли правительствам разных стран моделировать как

краткосрочные, так и долгосрочные последствия принимаемых мер при высокой степени неопределенности. Байесовский подход продемонстрировал ценность интеграции вероятностных методов и машинного обучения в ИАС ППУР для системы здравоохранения.

Технология цифровых двойников внедряется для подготовки к ЧС. Создаются гибридные модели распространения катастроф, основанные на физических законах, с моделями коррекции ошибок, строящимися на данных, разрабатываются виртуальные цифровые модели для управления ЧС в области общественного здравоохранения, которые в режиме реального времени обновляются потоками данных с различных датчиков и информационных систем. Такие цифровые двойники позволяют при помощи алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) симулировать различные сценарии развития катастроф и моделировать ресурсы, необходимые для эффективного реагирования на них [15, 16]. Виртуальные симуляции на основе цифровых макетов дают возможность персоналу служб экстренного реагирования отрабатывать навыки принятия решений и оценивать возможные последствия без риска для пациентов, тем самым повышая готовность к реальным ЧС.

Европейское пространство медицинских данных (European Health Data Space, EHDS) — программа Европейского Союза (ЕС), направленная на создание единой цифровой платформы для медицинских данных [17]. EHDS обеспечивает трансграничный доступ граждан к своим электронным медицинским записям и формирует правовую и техническую базу для безопасного вторичного использования медицинских данных в научных исследованиях и при внедрении инновационных технологий. Реализация данной программы свидетельствует о важности стандартизации и интероперабельности в международном масштабе, при которых системы поддержки принятия решений должны интегрироваться с подобными платформами, предоставляя доступ к большим массивам медицинских данных из разных стран.

Интегрированные национальные системы здравоохранения. Примером может служить опыт Национальной службы здравоохранения Великобритании (NHS) по созданию системы поддержки клинических решений (*NHS Pathways*),

позволяющей по телефону или онлайн проводить первоначальную сортировку пациентов, обратившихся за оказанием медицинской помощи в неотложной форме, с последующим направлением их к профильным врачам-специалистам. В связке с ней работает справочник (*Directory of Services*), предоставляющий актуальную информацию о доступности медицинских услуг и медицинских организаций в режиме реального времени. Данные системы интегрированы между собой и с другими компонентами NHS, обеспечивая эффективное распределение пациентов по уровням медицинской помощи, исходя из срочности случая обращения, местоположения пациента и загруженности медицинских организаций [18].

Система S-HELP (Securing Health Emergency Learning and Planning) была разработана в ЕС как комплексная платформа поддержки принятия решений для управления ЧС в здравоохранении [19]. S-HELP охватывает все этапы управления ЧС: от подготовки и обучения до реагирования и восстановления. В архитектуру S-HELP, изначально рассчитанную на межведомственное и межгосударственное взаимодействие, заложена поддержка стандартов интероперабельности, позволяющих координировать действия разных служб (стационары, амбулаторно-поликлинические учреждения, службы экстренного реагирования и ЧС) и обмениваться данными между странами. Данный проект подчеркивает, что для эффективной работы ИАС ППУР в условиях кризисов требуется не только техническая и семантическая совместимость (общие форматы данных и терминология), но и организационная, с едиными процедурами и протоколами взаимодействия между различными ведомствами.

В целом за рубежом сделан акцент на *модульных распределенных архитектурах*, обеспечивающих гибкость и устойчивость, а также на расширенной функциональности систем поддержки принятия решений, дополненных различными технологиями ИИ (включая машинное обучение, мультиагентные системы, байесовские модели), геоинформационными системами, симуляторами на основе цифровых двойников. Ключевыми характеристиками таких систем является их интероперабельность и масштабируемость: системы должны легко встраиваться в существующие информационные экосистемы и

при необходимости объединяться в сети на региональном или международном уровне.

Развитие систем поддержки принятия решений в Российской Федерации проходит прежде всего в контексте реализации Указа Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации», стимулирующего интеграцию технологий ИИ в здравоохранение, опираясь на электронные медицинские данные [20,21], а также данные из цифровых архивов Минздрава России [22], позволяющих, в том числе, решать прикладные задачи по созданию востребованных цифровых интеллектуальных продуктов для врачей и пациентов [23].

Конструктивно подобные ИАС ППУР должны строиться по *гибридному принципу* с использованием распределенной микросервисной архитектуры, выделением системных сервисов, баз знаний по клинической медицине, вычислительных агентов (микросервисов для аналитических функций) и интеллектуальных решающих модулей на основе ИИ. ИАС ППУР должна одновременно собирать данные из разных источников, быстро просчитывать сценарии и оставаться устойчивой при пиковых нагрузках, а при условии, что каждый блок отвечает за свою часть и при необходимости усиливается отдельно, надежность такой системыкратно возрастает. Разделение на системные сервисы, базы знаний, вычислительные блоки и ИИ-модули снижает взаимозависимость, упрощает обновления и контроль качества и позволяет быстрее вносить изменения без необходимости изменения настроек всей системы. Управление базами знаний (формализованными клиническими рекомендациями, моделями, пояснениями) может осуществляться через облачную платформу.

На сегодняшний день в отечественных исследованиях также подчеркивается необходимость всестороннего обеспечения кибербезопасности, прежде всего в отношении медицинских информационных систем и медицинских данных [24,25]. При проектировании систем особое внимание уделяется созданию защищенных хранилищ и каналов передачи данных, реализации строгой политики управления доступом к конфиденциальной информации пациентов, шифрованию данных при хранении и обмене, механизмам аудита и мониторинга действий

пользователей. Система безопасности выстраивается в соответствии с нормативными требованиями (защита персональных данных и иной «чувствительной» информации), что обеспечивает доверие к системе со стороны регуляторов и пользователей.

В Российской Федерации существует целый ряд ИАС ППУР [26], позволяющих осуществлять автоматизированный мониторинг показателей здоровья пациентов, прогнозировать риск развития заболеваний, формировать регистры (*Webiomed*), оценивать загруженность коечного фонда и медицинского оборудования, эффективность использования ресурсов, проводить сравнение медицинских организаций (*ЕЦП.ВІ (Медицинская система бизнес аналитики)*, *ЕМИАС, 1С: Медицина*, «*НЗ.Аналитика*», *Sitronics КТ*), анализировать загрузку диагностического оборудования (КТ, МРТ), управлять радиологическим рабочим процессом и контролировать качество предоставления диагностических услуг (*ЕРИС* (в составе *ЕРИС ЕМИАС*)), использовать системы визуализации, построения дашбордов, алгоритмы OLAP-анализа, прогнозирования, моделирования процессов оптимизации, управления ключевыми бизнес процессами в медицинской организации (*Prognoz Platform, Эксперт ВІ Здравоохранение*).

Кроме того, в рамках продолжающейся цифровой трансформации системы здравоохранения и перехода к работе в медицинских информационных системах нового поколения становится очевидным необходимость использования платформенного подхода в решении прикладных задач интеллектуальной обработки данных и моделирования, а также управления медицинскими процессами [27].

Представленный опыт демонстрирует, что в Российской Федерации в настоящее время в целом сформирован ландшафт решений (экосистема) функционирования ИАС ППУР, сопоставимый по целям с международными практиками. Вместе с тем стремительный рост объемов и гетерогенности потоков телеметрических данных, данных из медицинских информационных систем и мобильных клиентов, ужесточение требований к кибербезопасности и интероперабельности, определяют дальнейший вектор эволюционного развития ИАС ППУР, функционирующих на облачно-нативной микросервисной архитектуре.

Одним из приоритетных направлений следует считать создание автономной устойчивой и адаптивной интеллектуальной подсистемы, обеспечивающей поддержку руководителей медицинских организаций при кризисном функционировании в период ЧС и глобальных угроз, характеризующихся возрастающей непредсказуемостью и гетерогенностью.

Целью настоящего исследования является разработка алгоритма и прототипа архитектуры ИАС ППУР в медицинской организации при работе в условиях биологических, техногенных и геополитических вызовов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве исходной информации для проектирования архитектуры и функционального тестирования прототипа использовались нормативно-справочные данные, синтетические данные о ресурсах медицинских организаций, обезличенные датасеты и типовые сценарии ЧС. Каталог датасетов организован вокруг реестра медицинских организаций с полями для показателей коечного фонда, кадровой обеспеченности, мощности амбулаторно-поликлинического приема, обслуживаемого населения и координат, которые используются в качестве сквозных идентификаторов при объединении слоев.

Геопространственный слой включает границы региона и муниципальных образований с офлайн-кэшем и ручным импортом GeoJSON из OSM/Overpass. Реализован пакет из 50 сценариев глобальных вызовов с унифицированными числовыми столбцами, характеризующими потребность в ресурсах при дефиците коечного фонда, дополнительном медицинском персонале, вызовах скорой медицинской помощи, потребности в медицинских изделиях, синхронизированными для каждой медицинской организации.

Логистический блок импортирует остатки и суточное потребление лекарственных препаратов и медицинских изделий из JSON/CSV/HTML, рассчитывая горизонт планируемого потребления и передавая результаты для пересчета показателей текущей и перспективной потребности. На верхнем уровне сводные ключевые показатели эффективности агрегируются в интегральный индекс устойчивости с настраиваемыми весами и порогами оповещений. Итоговый индекс

формируется из субиндексов (коечный фонд, кадры, лекарственные препараты, оборудование, мощность амбулаторно-поликлинического приема) и сопровождается картой причинно-следственных связей. Отчетность и аналитика поддерживают экспорт файлов форматов CSV/JSON, диаграммы и тепловые карты, синхронизируясь с оптимизационными процедурами для ранжирования принимаемых управленческих решений.

Разработка прототипа информационно-аналитической системы осуществлялась с применением модульного подхода, обеспечивающего гибкость, масштабируемость и возможность интеграции с внешними источниками данных. Программная архитектура была разделена на четыре функциональных блока: фронтенд, бэкенд с вычислительной логикой, геоинформационный модуль и модуль имитационного моделирования с аналитикой.

Фронтенд-часть реализована с использованием *HTML5* для структурной разметки страниц и организации логики представления данных, *JavaScript* для взаимодействия с пользователем и динамического обновления контента, а также фреймворка *Tailwind CSS*, позволяющего обеспечить единый визуальный стиль интерфейса и ускорить процесс верстки. Для визуализации ключевых показателей эффективности, графиков и диаграмм были интегрированы библиотеки *Chart.js* и *D3.js*, что обеспечило наглядное представление результатов моделирования и анализа. Выбор этих технологий был обусловлен их кроссплатформенностью, широкой поддержкой профессиональным сообществом и низкими затратами на адаптацию под прикладные задачи.

Серверная логика и обработка данных реализованы на языках *Python* и *JavaScript*. Для разработки *API*, обмена данными между модулями и интеграции с пользовательским интерфейсом применялись фреймворки *Flask* и *FastAPI*.

Реализация подсистемы математической обработки данных и расчета статистических показателей выполнена путем интеграции в программный код библиотек *Pandas* и *NumPy*. Для обеспечения функций автоматизированного статистического и численного анализа в архитектуру бэкенда встроена библиотека *SciPy*. Применение *Python* было обусловлено его высокой производительностью при работе с массивами

данных и богатой экосистемой средств для научных расчетов. Проверка работоспособности разработанных алгоритмов осуществлялась методом функционального тестирования на синтетических наборах данных. Оценка статистической значимости различий показателей, необходимых для принятия управленческих решений, на реальном потоке данных не входила в задачи этапа прототипирования, так как требует проведения отдельного пилотного исследования в условиях промышленной эксплуатации ИАС ППУР.

Геоинформационный модуль построен с использованием сервиса *OpenStreetMap* и API сервиса *Яндекс.Карты*. Это позволило реализовать функции отображения картографических данных, построения маршрутов и расчета изохронов транспортной доступности медицинских организаций в пределах заданных временных интервалов. Дополнительно был реализован механизм интеграции с формами ввода данных, что обеспечивает оперативное обновление информации о медицинских организациях и их ресурсах.

Модуль имитационного моделирования и аналитики разработан на основе библиотеки *SimPy*, обеспечивающей событийное моделирование потоков пациентов и бизнес-процессов медицинской организации. Генерация стохастических параметров модели реализована с использованием статистических библиотек *Python*, позволяющих формировать распределения времени обслуживания и интервалов между прибытием пациентов. В рамках этого же модуля был реализован алгоритм расчета интегрального индекса устойчивости, позволяющий оценивать готовность медицинской организации к работе в условиях ЧС и выявлять ключевые факторы, влияющие на ее функционирование.

Разработка прототипа, отладка программного кода и локальное тестирование взаимодействия микросервисов осуществлялись на рабочих станциях под управлением операционной системы *Windows 10* (с использованием подсистемы *WSL/Docker*) и веб-браузеров *Google Chrome* и *Яндекс.Браузер*. Все версии библиотек и фреймворков зафиксированы в документации проекта, что обеспечивает воспроизводимость результатов и совместимость при дальнейшем развитии прототипа информационно-аналитической системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

Подготовлен прототип ИАС ППУР в медицинской организации при работе в условиях биологических, техногенных и геополитических вызовов, реализующей сервисно-ориентированную архитектуру и объединяющей более десяти взаимодействующих микросервисов в единую цифровую среду. Сквозная логика обмена данными построена на унифицированных форматах и механизмах двусторонней верификации, благодаря чему структурно разнородные сведения о пациентах и ресурсах медицинской организации (кадры, коечный фонд, материально-техническая оснащенность) консолидируются в одном месте и сохраняют возможность сопоставления между структурными подразделениями и в целом медицинскими организациями как в пределах муниципального образования, так и в пределах региона. Такая согласованность служит фундаментом для высокоуровневых алгоритмов аналитики, прогнозирования и оптимизации, заложенных в прикладных модулях ИАС ППУР.

Гибкость платформы дополнительно усиливается за счет открытого API и набора «интеграционных коннекторов», позволяющих с минимально необходимой дополнительной структуризацией подключать новые ведомственные реестры, телеметрические источники и сторонние сервисы ИИ. Архитектура системы предусматривает возможность описания правил *ETL*-конвейера (*Extract-Transform-Load*) на декларативном языке. На уровне конфигурации задаются источники данных, правила их анализа, исключения дублирующих записей и проведения кросс-валидации, минимизируя тем самым трудозатраты интеграторов и обеспечивая оперативное масштабирование принятого решения под меняющиеся инфраструктурные требования.

Ядром пространственного слоя является **геоинформационный модуль** (рисунок 1), отображающий на карте топологию медицинской инфраструктуры (медицинские организации, склады, размещение мобильных медицинских бригад, транспортные артерии и логистические хабы) для рассматриваемой территории и обеспечивающий возможности автоматического расчета индекса территориальной доступности, построения изохронов движения пациентов и

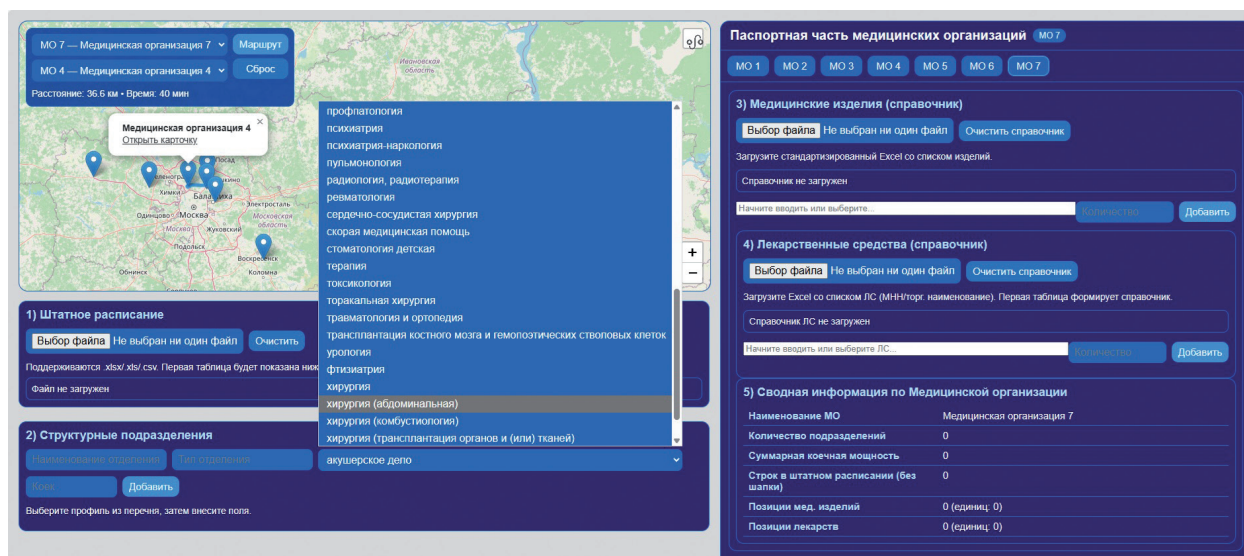


Рисунок 1 — Пример интерфейса геоинформационного модуля ИАС ППУР.

экстренных служб, а также визуализации динамики эпидемических вспышек, зон поражения при ЧС и участков перегрузки ресурсных возможностей отдельных медицинских организаций или системы здравоохранения в целом.

Возможности данного конструктивного решения дают представление о том, как интерактивное картографирование позволяет управленцу в режиме одного окна планировать перераспределение кадров, медикаментов и мобильных комплексов, организуя географические кластеры и предотвращая избыточную нагрузку от потока пациентов на мощности существующей сети медицинских организаций.

С прикладной точки зрения геоинформационный модуль тесно связан с компонентом **ситуационного планирования ЧС**. Последний должен импортировать сценарии аварий, моделировать распространение поражающих факторов по местности (химические, радиационные, эпидемические угрозы), автоматически оценивать потребность в коечном фонде, составе медицинских бригад, объеме необходимых лекарственных препаратов и транспортных средств для эвакуации. Логическая архитектура представлена фронтенд-модулем, с возможностью выбора типа сценария, ввода нескольких релевантных параметров (длительность, момент пиковой нагрузки, ориентировочный охват населения, компартментная модель (для

биологических вызовов)) и запуска расчета. По результатам моделирования и расчета отображаются ключевые показатели и наглядные диаграммы, прежде всего в части потребности в ключевых ресурсах (дополнительных койках, аппаратах ИВЛ, вызовах скорой медицинской помощи), динамике ежедневной потребности, направлениям работы, требующим усиления. Первичные данные берутся из встроенных справочников и загружаемых таблиц. Эксплуатация сценариев в медицинской организации строится по ролевому принципу и интегрирована в контур управленческих решений. Руководитель (главный врач, заместитель главного врача по медицинской части) выбирает релевантный сценарий, анализирует сводный баланс ресурсов и на его основе принимает решения о необходимости развертывания коечного фонда, перераспределения медицинского персонала и управления запасами лекарственных препаратов и медицинских изделий. У врача-эпидемиолога медицинской организации существует возможность параметризовать модель, оценивать амплитуду и длительность волны заболеваемости, формировать рекомендации по режимам инфекционного контроля. Заведующие отделениями могут использовать профили нагрузки по времени для планирования рабочих смен и обеспечения отделений необходимыми запасами лекарственных препаратов и медицинских

изделий. Приемное отделение и диспетчерская служба скорой медицинской помощи могут осуществлять мониторинг ожидаемых пиков обращений, оперативно усиливать выездные бригады, корректировать маршрутизацию пациентов.

Модуль **конструирования и анализа бизнес-процессов** (рисунок 2) представляет собой визуальный BPMN-редактор (*Business Process Model and Notation*), в котором параметризованы клинические и административные маршруты: для каждого этапа задаются нормативы времени на выполнение рабочих процессов, возможные трудозатраты и контрольные точки этапов, характеризующие эффективность их выполнения. Заложенная в прототип логика обеспечивает сопоставление параметров исполнения процессов с эталонными моделями, позволяя выявлять тренды отклонений еще до момента достижения ключевыми показателями эффективности (KPI) критически значимых значений. Интеграция с фактическими данными, полученными в режиме реального времени, дает возможность автоматической трансформации процессов и маршрутов с формированием уведомлений ответственным исполнителям и предлагает варианты разделения потока пациентов.

Системный анализ процессов дополняет комплекс статистического и имитационного моделирования потоков пациентов. В разработанном прототипе ИАС ППУР поступление пациентов в медицинскую организацию задается как нестационарный пуассоновский поток $M(t)$ с кусочно-постоянной или плавно изменяющейся интенсивностью $\lambda(t)$, калибруемой по фактическим данным обращаемости и выходам модуля ситуационного планирования ЧС (эпидемические сценарии на базе компартментных моделей SIR/SEIR и триангулярных кривых для ситуаций массового поступления пострадавших). На вход модуль принимает эмпирические распределения показателей интенсивности потока пациентов, длительности основных операционных процедур, структуры пациентов по степени тяжести состояния, которые аппроксимируются распределениями Эрланга, Вейбулла, логнормальным и триангулярным распределениями. Выбор конкретного типа распределения и его параметров (среднее значение, дисперсия, коэффициент вариации, коэффициенты формы) осуществляется по результатам аппроксимации эмпирических данных и может быть интерактивно изменен пользователем в интерфейсе модуля. На этой основе строится дискретно-событийная

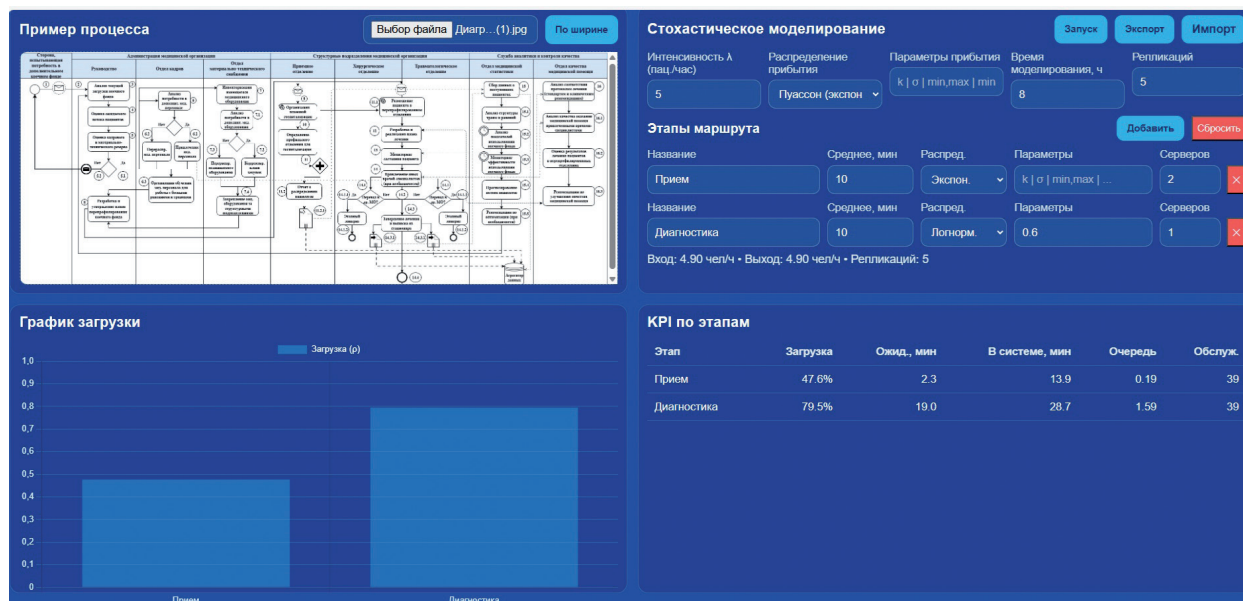


Рисунок 2 — Пример интерфейса модуля конструирования и анализа бизнес-процессов ИАС ППУР.

или агентная модель внутрибольничного контура в виде сети массового обслуживания типа $M(t)/G/c/K$ (где: $M(t)$ — входящий поток; G — время обслуживания; c — каналы обслуживания (врачи или койки); K — предельные возможности системы) с приоритетным обслуживанием пациентов тяжелой категории и ограниченной емкостью очередей, где каждый виртуальный пациент имеет индивидуальные параметры. Модуль позволяет оценивать не усредненную, а фактическую детализированную картину: какое количество пациентов и в какой момент времени пересекутся в приемном отделении стационара, когда лабораторная и (или) диагностическая служба достигнет верхней границы возможностей использования имеющихся ресурсов, как повлияет увеличение частоты прибытия автомобилей скорой помощи на пропускную способность и вероятность отказа/перенаправления. Временной интервал моделирования в типовых сценариях по умолчанию составляет 60 суток (с возможностью ручной настройки в диапазоне от 1 до 365 суток), при этом расчет динамики процессов выполняется с суточным шагом на основе аналитических кривых (Гаусс, треугольная) или компартментных эпидемиологических моделей (SIR/SEIR). Для каждого сценария выполняется детерминированный расчет (однократная генерация временного ряда), что обеспечивает мгновенную оценку ключевых показателей (например, пиковая потребность в коечном фонде и аппаратах ИВЛ, дефицит медицинского персонала). Для проведения анализа чувствительности реализована возможность интерактивного изменения параметров нагрузки с представлением полученных результатов в виде графиков динамики суточной потребности и сводных таблиц дефицитов ресурсов. При превышении заранее настроенных порогов ключевых показателей формируется проактивное оповещение, позволяющее руководителю запускать превентивные меры без дополнительного анализа массивов статистических данных.

Полученные в ходе имитационного моделирования прогнозы передаются в **оптимизационный модуль**, основанный на комбинации линейного, целочисленного и стохастического программирования. Критерий оптимальности задается в виде целевой функции, агрегирующей четыре практические цели: максимально

удовлетворить потребность в объемах оказания медицинской помощи с соблюдением временных нормативов, минимизировать совокупные расходы, снизить риск возникновения дефицита отдельных ресурсов, ограничить операционные последствия при перераспределении ресурсов. Каждый компонент предварительно нормируется с определением значимости и веса в конкретном сценарии.

Постановка задачи представляет собой двухстадийную стохастическую оптимизацию. На первом этапе (заранее, до того, как будут известны фактические значения случайных параметров) принимаются целочисленные (дискретные) решения в отношении привлечения резервных мощностей, развертывания дополнительных коек, перераспределения оборудования и запасов. На втором этапе (после уточнения фактических значений) по каждому сценарию применяются непрерывные линейные решения в отношении распределения потоков пациентов, рабочего времени медицинского персонала, транспорта и расхода лекарственных препаратов и медицинских изделий. Источником неопределенности служат выборки из симуляций: траектории спроса, длительности процедур, времени доезда, доступности ресурсов. Ограничения модели описывают балансы потребностей и возможностей, фактической обеспеченности и нормативных требований. С их учетом решается задача максимизации критерия оптимальности с дискретными переменными первого этапа и непрерывными переменными второго этапа по множеству сценариев.

Модуль обеспечивает генерацию ранжированного набора сценариев с учетом логистических ограничений, нормативов времени, профиля пациентов и доступности ресурсов. Пользователь получает не единственное «лучшее» решение, а несколько альтернативных вариантов с оценкой потенциальной эффективности и затрат на реализацию, риска и операционных последствий. Выбранный сценарий может быть автоматически экспортирован в диспетчерский сервис, обеспечивая бесшовный переход от расчета к исполнению.

Для поддержания операционного контура в актуальном состоянии ИАС ППУР должна располагать **модулем управления запасами и**

логистикой, обеспечивающим сквозной учет остатков и сроков годности, прослеживание движения препаратов между складами и отделениями, моделирование потребности в условиях растущего спроса или нарушенной транспортной инфраструктуры. Данный компонент позволяет автоматически формировать заявки на пополнение недостающих ресурсов, выбирать оптимальные маршруты доставки, а также переадресовывать заявки в соседние медицинские организации, если потребность может быть закрыта за счет внутренней ротации имеющихся ресурсов.

Мониторинг результата может быть реализован через **двухуровневую панель KPI и модуль индексов устойчивости** (рисунок 3). Базовые метрики данного модуля включают загрузку коечного фонда, обеспеченность кадрами, наличие лекарственных средств, которые агрегируются в частные индексы службы, а далее в интегральный индекс устойчивости медицинской организации.

Расчет интегрального индекса ($I_{инт.}$) выполняется поэтапно. На первом этапе исходные ресурсные показатели переводятся в сопоставимые интенсивные величины (на 10 тыс. населения, на 100 коек, в днях автономной работы). На втором этапе для каждого ресурсного блока

формируется субиндекс (I_k) как доля достижения целевого (нормативного или планового) уровня по принципу:

$$I_k = \min \left(100, \frac{x_k}{T_k} \times 100 \right),$$

где: x_k — фактическое значение показателя, T_k — целевое значение (для прямых показателей эффективности). Ограничение значений уровнем 100% (функция min) позволяет интерпретировать каждый субиндекс как степень достижения целевого ориентира, исключая перевыполнение плана в качестве компенсирующего фактора.

Агрегация субиндексов в интегральный индекс реализуется методом взвешенной линейной свертки:

$$I_{инт.} = \sum_k w_k \times I_k,$$

где: w_k — веса ресурсных блоков, сумма которых равна 1. В базовой конфигурации наибольшие веса присваиваются коечному фонду и кадровому обеспечению, промежуточные — обеспеченности лекарственными средствами и медицинским оборудованием, меньшие — мощностям амбулаторного приема.

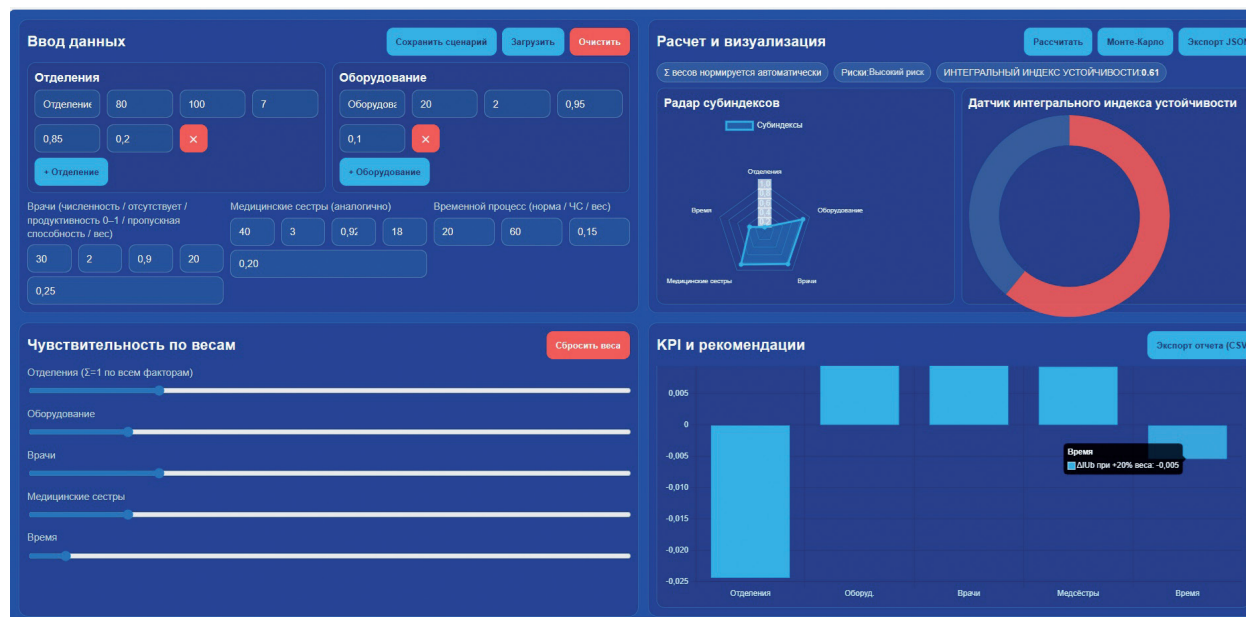


Рисунок 3 — Пример интерфейса двухуровневой панели KPI и модуля интегрального индекса устойчивости медицинской организации в ИАС ППУР.

При использовании сценарного имитационного моделирования отдельные субиндексы корректируются с учетом прогнозируемых дефицитов ресурсов, что позволяет учитывать потенциальное напряжение системы при возрастании нагрузки.

При отклонении индекса от целевого значения модуль инициирует каскад уведомлений, прикрепляя к предупреждению карту причинно-следственных связей, которая показывает, какое конкретно звено ресурса наиболее значимо влияет на низкие значения показателя. Такой подход облегчает приоритизацию постановки задач и формирует доказательную базу для принятия управленческих решений.

Разработанный **модуль автоматической отчетности**, использующий шаблоны *OpenDocument XML*, настроен на формирование регламентных и *Ad-hoc* документов в форматах *PDF, Excel* и *XML*, а также позволяет вставлять тепловые карты, графики отклонений, интерактивные таблицы в динамическом режиме, а встроенный планировщик — исполнять циклические задачи и сохранять историю версий для проведения аудита. В реальной практике это освобождает административный персонал от рутинного обобщения сводных таблиц или текстовых файлов и снижает риск ошибок ручного ввода.

Информационная безопасность обеспечивается **модулем ролевого доступа**, поддерживающим многофакторную аутентификацию, шифрование и поведенческий анализ сессий. Многофакторная аутентификация, шифрование данных при передаче и хранении, мониторинг сессий, неизменяемый журнал аудита, а также разделение внутренней инфраструктуры на изолированные сегменты и взаимная проверка подлинности между компонентами рассматриваются как управленческие инструменты реализации трех базовых свойств: конфиденциальности, целостности и доступности. При любом нетипичном поведении пользователя система должна автоматически ограничивать его права, фиксировать событие в защищенном журнале, уведомлять ответственного администратора и инициировать проверку.

Оценка достаточности мер по обеспечению информационной безопасности строится через управленческую триаду, предполагающую последовательные действия по оценке риска,

осуществлению контроля и надзора. Во-первых, угрозы классифицированы (внешние атаки, инсайдерские действия, операционные сбои), и для них применяются как технические, так и организационные средства контроля (регламенты минимально необходимых прав доступа и их периодическая ревизия, разделение обязанностей, обучение персонала и ответственность за нарушение режима безопасности). Во-вторых, обеспечена процессная устойчивость, выраженная в безопасной разработке и проведении регулярных испытаний на уязвимости, резервном копировании с проверкой восстановления, целевых показателях времени обнаружения и реагирования на инциденты, синхронизированными с требованиями обеспечения непрерывности медицинских процессов. В-третьих, встроены механизмы отчетности и соответствия требованиям отраслевого регулирования (непрерывный аудит, хранение и верификация записей, план реагирования с ролевыми сценариями и периодическими учениями). В совокупности это позволяет в полной мере придерживаться политики «нулевого доверия».

Для оперативной координации действий спроектирован и реализован на уровне интерфейсов **модуль связи**, предусматривающий интеграцию с *API SMS*-шлюзов, сервисами *push*-уведомлений и *e-mail*. В текущей версии прототипа функционал работает в режиме эмуляции отправки сообщений во встроенный корпоративный мессенджер. Руководитель имеет возможность формировать групповые рассылки, а система отслеживает факт доставки и подтверждения получения критически важных сообщений. Такой механизм повышает скорость информационного обмена и минимизирует риск потери времени на межведомственных согласованиях, что особенно важно при необходимости экстренной мобилизации определенного типа ресурсов.

Полевое использование ИАС ППУР обеспечивается **адаптивным веб-интерфейсом для мобильных устройств**, поддерживающим работу в автономном режиме с последующей асинхронной репликацией. Медицинские бригады могут фиксировать фотоотчеты, добавлять геометки и получать актуальные инструкции вне зоны стабильного покрытия, тем самым расширяя радиус действия цифровой платформы и повышая качество первичного реагирования.

Архитектурная консолидация указанных компонентов в единый функциональный контур показывает, что предлагаемая система может выступать не просто агрегатором данных, а полнофункциональной экосистемой поддержки принятия решений. Функциональные возможности системы ориентированы на поддержку динамической адаптации клинико-организационных процессов к колебаниям внешней среды, способствуя повышению устойчивости сети медицинских организаций к пиковым нагрузкам и ЧС, а также формированию объективной доказательной базы для стратегического и тактического управления. Научно-методическая проработка архитектурных решений, формализация алгоритмов и практическая направленность сценариев применения подчеркивают полезность предлагаемой системы для решения широкого круга задач — от плановой оптимизации ресурсов до высокоточного сценарного моделирования рисков. Применение такой платформы может позволить перевести управление медицинскими организациями и системой здравоохранения на уровень предиктивных, отчуждаемых и воспроизводимых практик.

ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанный прототип ИАС ППУР интегрирует ряд функциональных блоков, каждый из которых решает собственный класс управленческих задач, но при этом может работать в связке с другими подсистемами, формируя целостную архитектуру поддержки принятия решений в условиях биологических, техногенных и геополитических вызовов. С концептуальной точки зрения выбранная модульная, сервисно-ориентированная архитектура обусловлена необходимостью одновременно интегрировать разнородные источники данных, поддерживать полный цикл ситуационного управления (от геопространственного мониторинга до оптимизационных расчетов) и сохранять устойчивость к пиковым нагрузкам в условиях ЧС. Распределение функционала между относительно независимыми сервисами (ГИС-подсистема, модуль сценариев и имитационного моделирования, оптимизационный блок, логистика, коммуникации, панель KPI и интегрального индекса устойчивости, отчетность) позволяет масштабировать и обновлять отдельные компоненты без остановки всей системы, а также

адаптировать состав модулей под профиль конкретной медицинской организации или региона. При этом архитектура ИАС ППУР изначально проектировалась так, чтобы встраиваться в существующий цифровой контур системы здравоохранения, где медицинские информационные системы, регистры и системы мониторинга выступают источниками данных, опираясь на которые, разработанный прототип обладает расширенными возможностями аналитики, моделирования и поддержки принятия управленческих решений.

Одним из ключевых модулей ИАС ППУР является геоинформационная подсистема, которая обеспечивает пространственную привязку медицинских организаций и их ресурсных возможностей. На основе открытых картографических сервисов реализована возможность построения маршрутов с учетом дорожной инфраструктуры и вычисления изохронов транспортной доступности. Интеграция с загрузочными формами позволяет оперативно вносить и актуализировать сведения о кадровом составе, структурных подразделениях, запасах медицинских изделий и лекарственных средств, формируя общий паспорт медицинской организации. Такое решение повышает ситуационную осведомленность и позволяет в реальном времени координировать распределение потоков пациентов между медицинскими организациями, что особенно критично при ЧС.

Следующим по значимости является модуль BPMN-моделирования и стохастической симуляции, который предназначен для формализации и анализа ключевых бизнес-процессов медицинской организации. Возможность визуализации этапов маршрута пациента, вариативного изменения функции распределения временных величин (прибытия и обслуживания в структурных подразделениях медицинской организации), а также проведения многократных репликаций моделирования, обеспечивают статистически значимую оценку пропускной способности и выявление проблемных участков в рабочих этапах процессов. Применение различных типов распределений случайных величин (Пуассона, Эрланга, Вейбулла, логнормальное, треугольное и иные) приближает модель к реальным условиям функционирования, а панель KPI позволяет переводить результаты моделирования в управленческие показатели.

Необходимость смещения фокуса с простой регистрации данных на управление процессами подтверждается анализом итогов внедрения ИИ в здравоохранении России [21]. Авторы отмечают, что, несмотря на насыщение рынка диагностическими сервисами, сохраняется острая потребность в организационных изменениях и развитии методологии внедрения управленческих решений. Разработанный нами в прототипе ИАС ППУР модуль BPMN-моделирования предлагает решение данной задачи, предоставляя инструмент для проектирования и оптимизации тех самых рабочих процессов, изменение которых исследователи называют условием эффективности цифровой трансформации отрасли.

Наконец, третий ключевой модуль позволяет рассчитывать и визуализировать интегральный индекс устойчивости медицинской организации. Данный модуль ИАС ППУР реализует математическую модель комплексной оценки готовности медицинской организации к функционированию в критических условиях. Расчет субиндексов по ключевым группам факторов (отделения и коечный фонд, медицинское оборудование, врачи, медицинские сестры, временные параметры ключевых лечебно-диагностических процессов) с последующей агрегацией в интегральный показатель дает возможность количественно сравнивать разные сценарии и обеспечивать динамический мониторинг. Инструменты анализа чувствительности позволяют варьировать веса факторов и оценивать их влияние на итоговую устойчивость, а встроенные рекомендации и оптимизационные алгоритмы предлагают конкретные меры по использованию имеющихся ресурсов.

Дополнительно в архитектуре системы предложено реализовать ряд модулей, которые не сопровождались графической иллюстрацией, но играют, однако, значимую роль в обеспечении полноты функционирования ИАС ППУР. К ним относятся подсистемы обработки и интеграции нормативно-справочной информации, модули статистического и сравнительного анализа, инструменты автоматизированного формирования отчетности, а также средства аудита информационной безопасности и контроля прав доступа.

Особое внимание при проектировании в ИАС ППУР модуля безопасности должно быть уделено работе с данными реальной клинической

практики, используемыми для калибровки имитационных моделей. Для обеспечения валидности моделирования (сохранения реальных временных интервалов между этапами лечебного процесса) при строгом соблюдении конфиденциальности в системе должны использоваться подходы к обезличиванию [25]. В частности, применение метода случайного смещения дат позволяет сохранить исходную темпоральную информативность клинических данных, необходимую для корректной работы алгоритмов массового обслуживания, гарантируя при этом невозможность реидентификации пациентов.

Совместное использование всех модулей формирует замкнутый цикл поддержки принятия управленческих решений: от сбора и визуализации пространственно-ресурсной информации, через моделирование и анализ процессов, до комплексной оценки и выработки прикладных мер по обеспечению устойчивого функционирования медицинских организаций в критических условиях. В данном контексте выбранная архитектура может рассматриваться как оптимальная для заявленной цели, поскольку сочетает в себе преимущества модульности, масштабируемости и интероперабельности с существующими системами цифрового контура здравоохранения.

На этапе проектирования прототипа ИАС ППУР рассматривалось несколько альтернативных вариантов его структуры и направлений возможного использования. Первый подход предполагал развитие решения как монолитного модуля на базе существующей медицинской информационной системы с включением в нее функций моделирования и аналитики. Такой вариант теоретически упрощал бы интеграцию с клиническими данными, но существенно повышал связанность компонентов, усложнял обновление и делал систему менее устойчивой к отказам, особенно при ресурсоемких сценарных расчетах и работе с большими объемами данных. Второй вариант предполагал использование классической структуры, совмещающей витрину данных и BI-платформу, в рамках которой ИАС ППУР фактически превращалась бы в набор дашбордов и отчетов, выступая надстройкой для агрегированного хранилища показателей. Однако такой подход не позволил бы реализовать тесно связанный контур

имитационно-оптимизационного моделирования и оперативного управления логистикой и коммуникациями. Выбранная гибридная сервисно-ориентированная архитектура стала, по сути, компромиссным решением, позволяющим сохранить относительно низкую загруженность сервисов, обеспечивая совместимость с существующими МИС и регистрами, а также достаточную вычислительную гибкость для реализации сложных сценариев и задач оптимизации.

Сопоставление разработанного прототипа ИАС ППУР с существующими отечественными и зарубежными решениями показывает, что он занимает промежуточную позицию между крупномасштабными системами мониторинга и управления общественным здравоохранением и специализированными BI-платформами медицинских организаций. Зарубежные решения, такие как ГИС-платформа GEPIMI, ориентированы преимущественно на пространственный мониторинг, раннее предупреждение и маршрутизацию в масштабах региона, обеспечивая ситуационную осведомленность и поддержку диспетчеризации, но не углубляются в детализированную оптимизацию внутрибольничных бизнес-процессов и ресурсных решений на уровне конкретной медицинской организации. Аналогично, системы класса S-HELP и национальные экосистемы, формируемые в рамках EHDS и интегрированных сервисов NHS (NHS Pathways, Directory of Services), фокусируются на межведомственном и межуровневом управлении потоками пациентов и информацией, в то время как моделирование внутренних процессов медицинских организаций, оценка их пропускной способности и оптимизация использования ресурсов в них представлены фрагментарно.

Представленные российские разработки обеспечивают, прежде всего, ретроспективный и оперативный мониторинг показателей, построение дашбордов, OLAP-анализ, оценку загруженности коечного фонда и оборудования, формирование регистров и аналитических отчетов, при этом в меньшей степени ориентируясь на единую сквозную модель, которая бы связывала геоинформационное представление инфраструктуры, BPMN-моделирование, имитационное моделирование, учитывающее распределение случайных величин, стохастическую оптимизацию распределения ресурсов и расчет

интегрального индекса устойчивости в рамках единого архитектурного контура.

Предлагаемый прототип ИАС ППУР отличается от указанных аналогов тем, что реализует именно такой замкнутый цикл: от геопроостранственной визуализации сети медицинских организаций и сценариев глобальных вызовов через формализованные BPMN-модели и дискретно-событийную и (или) агентную симуляцию потоков пациентов, к оптимизационным расчетам, логистическому управлению запасами, коммуникационному модулю и двухуровневой панели KPI с интегральным индексом устойчивости.

В отличие от многих существующих систем, работающих как надстройки над хранилищами медицинских данных или как отдельные специализированные сервисы, прототип изначально проектируется как модульная платформа, в которой все подсистемы (ГИС, имитационное и оптимизационное моделирование, логистика, отчетность, коммуникации, информационная безопасность) используют согласованный набор идентификаторов и общую модель данных. Это позволяет не только анализировать ретроспективные показатели, но и прогнозировать альтернативные сценарии, количественно сравнивать их по интегральному индексу устойчивости и соотносить результаты моделирования с прикладными управленческими решениями по развертыванию дополнительных коек, перераспределению медицинского персонала и управлению запасами.

Еще одним отличительным аспектом прототипа ИАС ППУР является его изначальная параметризация под биологические, техногенные и геополитические сценарии, что отличает его от значительной части отечественных и зарубежных решений, разрабатывавшихся под конкретные классы ЧС (например, наводнения или отдельные эпидемии) или только под плановую деятельность медицинских организаций. В совокупности это позволяет рассматривать представленный прототип не только как очередную информационно-аналитическую систему мониторинга, но и как архитектурный шаблон для построения устойчивых и интероперабельных ИАС ППУР нового поколения как на уровне медицинской организации, так и на уровне региональной системы здравоохранения.

С теоретической точки зрения результаты проведенного исследования демонстрируют, каким образом в прототипе ИАС ППУР классические методы системного анализа и теории массового обслуживания могут быть связаны с современными подходами к построению облачно-нативных, микросервисных экосистем в здравоохранении. Важным результатом является также методический переход от статистических и имитационных оценок к управленческим метрикам (KPI и интегральный индекс устойчивости), что позволяет рассматривать ИАС ППУР не только как инструмент визуализации данных, но и как формализованный механизм трансляции результатов моделирования в регламентные управленческие решения.

С практической точки зрения предлагаемая архитектура и прототип ИАС ППУР могут выступать базой для формирования нового слоя ситуационного управления в цифровом контуре здравоохранения. Фактически выделяется еще один уровень, связывающий медицинские информационные системы, регистры и системы мониторинга с инструментами сценарного моделирования, оптимизации и координации действий. Это создает предпосылки к переходу от ретроспективного мониторинга и реактивного подхода к проактивному управлению, при котором заранее оцениваются последствия эпидемических подъемов, массового поступления пострадавших, перебоев в логистике, планируется развертывание коек, перераспределение кадровых ресурсов, потребность в лекарственных средствах и расходных материалах, оптимизируется маршрутизация пациентов и взаимодействие с выездными службами.

Вместе с тем результаты исследования и предложения по разработке прототипа ИАС ППУР следует интерпретировать с учетом ряда ограничений. Во-первых, оценка осуществлялась преимущественно на синтетических и обезличенных наборах данных, отражающих типовые сценарии функционирования, что ограничивает возможность экстраполяции результатов на все виды медицинских организаций. Объективная оценка эффективности разработки требует подключения реального потока данных и многоцентровой пилотной апробации. Во-вторых, реализованные модельные компоненты (распределения интенсивности потоков,

параметры длительности процедур, допущения о структуре пациентов и т.д.) неизбежно упрощают реальную ситуацию и нуждаются в дальнейшей калибровке под специфику отдельных сценариев ЧС, профилей медицинской помощи и конкретных медицинских организаций. В-третьих, прототип пока не в полной мере закрывает вопросы промышленной эксплуатации с проведением нагрузочных тестов в условиях большого числа параллельных сценариев, не в полном объеме реализует механизмы непрерывного мониторинга полноты и качества данных, а также автоматического разрешения конфликтов при интеграции с внешними системами. В-четвертых, внедрение ИАС ППУР предъявляет высокие требования к организационной зрелости медицинской организации в части регламентирования процессов оказания медицинской помощи, стандартизации операционных процедур, обеспечения подготовки пользователей и выстраивания контура кибербезопасности.

В перспективе расширение системы может быть направлено на более тесную интеграцию модулей через единый слой данных, автоматизированный обмен результатами моделирования и расчетов, а также подключение внешних источников, в том числе региональных и федеральных регистров для повышения полноты и актуальности информации. Данное решение позволит перейти от локальной поддержки отдельных задач к единой платформе, обеспечивающей непрерывное ситуационное управление медицинскими организациями и системой здравоохранения в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненное исследование было направлено на разработку прототипа ИАС ППУР в медицинской организации, функционирующей в условиях биологических, техногенных и геополитических вызовов. В работе продемонстрирована реализуемость комплексного архитектурного подхода, интегрирующего геоинформационные технологии, инструменты моделирования бизнес-процессов, модули имитационного и оптимизационного анализа, а также средства интегральной оценки устойчивости. Реализация системы в виде набора взаимосвязанных микросервисов с открытым API и модульной архитектурой показывает возможность

масштабирования решения, его адаптации к различным сценариям функционирования и интеграции с внешними информационными ресурсами.

На данном этапе прототип ИАС ППУР следует рассматривать прежде всего как технологическую и методологическую платформу, предназначенную для консолидации данных о ресурсах, потоках пациентов и инфраструктуре, проведения многофакторного моделирования и прогнозирования, а также формирования доказательной базы для принятия управленческих решений. Гипотетически интеграция подобной платформы в контуры управления медицинской организацией может способствовать повышению готовности к реагированию на ЧС, сокращению времени подготовки управленческих решений и более рациональному распределению ресурсов. Однако количественная оценка таких эффектов, включая анализ точности прогнозов имитационной модели, влияния предлагаемых алгоритмов на дефицит ресурсов, совокупные затраты, показатели времени ожидания и загрузки коечного фонда, требует отдельного эмпирического исследования.

Корректная оценка результативности применения ИАС ППУР предполагает использование потока реальных управленческих данных и (или) данных полноформатных тренингов, сопоставление сценариев «с использованием» и «без использования» системы, статистически обоснованный период наблюдения и выбор адекватного дизайна исследования («до/после», «контроль/внедрение» и другие варианты квазиэкспериментальных схем). Проведение такого этапа верификации и оценки эффекта планируется как следующий шаг после доведения прототипа до стадии пилотной эксплуатации и выходит за рамки задач, решаемых в настоящей статье.

Вместе с тем предложенные архитектурные и методологические решения демонстрируют потенциал дальнейшего развития системы за счет интеграции с федеральными и региональными информационными системами, базами данных и регистрами, внедрения алгоритмов машинного обучения для повышения точности прогнозов и расширения аналитического инструментария, а также трансформации межведомственного взаимодействия в сторону сквозных цифровых процессов управления в системе здравоохранения.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Visave, J. Transparency in AI for emergency management: building trust and accountability. *AI Ethics*. 2025; 5, 3967-3980. doi:10.1007/s43681-025-00692-x.
2. Есмагамбетов Т.У., Шикунская О.М. Информационно-аналитическая поддержка деятельности ситуационного центра МЧС // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — №3(1). — С.18-23. [Esmagambetov TU, SHikul'skaya OM. Informacionno-analiticheskaya podderzhka deyatel'nosti situacionnogo centra MCHS. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016; 3(1): 18-23. (In Russ.)] doi: 10.17513/snt.35684.
3. Cozzoli N, Salvatore FP, Faccilongo N, Milone M. How can big data analytics be used for healthcare organization management? Literary framework and future research from a systematic review. *BMC Health Serv Res*. 2022; 22(1): 809. doi: 10.1186/s12913-022-08167-z.
4. Elkady S, Hernantes J, Labaka L. Decision-making for community resilience: A review of decision support systems and their applications. *Heliyon*. 2024; 10(12): e33116. doi: 10.1016/j.heliyon.2024. e33116.
5. Калач А.В., Ничепорчук В.В., Батуро А.Н. Поддержка принятия управленческих решений при защите территорий от затоплений // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2021. — №1. — С.74-86. [Kalach AV, Nicheporchuk VV, Batur AN. Podderzhka prinyatiya upravlencheskih reshenij pri zashchite territorij ot zatopenij. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii*. 2021; 1: 74-86. (In Russ.)] doi:10.17308/sait.2021.1/3372.
6. Ptochos D, Panopoulos D, Metaxiotis K, Askounis D; John Psarras. Using internet GIS technology for early warning, response and controlling the quality of the public health sector. *Int J Electron Healthc*. 2004; 1(1): 78-102. doi: 10.1504/IJEH.2004.004661.
7. Safdari R, Shoshtarian Malak J, Mohammadzadeh N, Danesh Shahraki A. A Multi Agent Based Approach for Prehospital Emergency Management. *Bull Emerg Trauma*. 2017; 5(3): 171-178.

8. Avila K, Sanmartin P, Jabba D, Jimeno M. Applications Based on Service-Oriented Architecture (SOA) in the Field of Home Healthcare. *Sensors (Basel)*. 2017; 17(8): 1703. doi: 10.3390/s17081703.
9. Wright A, Sittig DF. SANDS: a service-oriented architecture for clinical decision support in a National Health Information Network. *J Biomed Inform*. 2008; 41(6): 962-981. doi: 10.1016/j.jbi.2008.03.001.
10. Loya SR, Kawamoto K, Chatwin C, Huser V. Service oriented architecture for clinical decision support: a systematic review and future directions. *J Med Syst*. 2014; 38(12): 140. doi: 10.1007/s10916-014-0140-z.
11. Strasberg HR, Rhodes B, Del Fiol G, Jenders RA, Haug PJ, Kawamoto K. Contemporary clinical decision support standards using Health Level Seven International Fast Healthcare Interoperability Resources. *J Am Med Inform Assoc*. 2021; 28(8): 1796-1806. doi: 10.1093/jamia/ocab070.
12. Bathelt F, Lorenz S, Weidner J, Sedlmayr M, Reinecke I. Application of Modular Architectures in the Medical Domain - a Scoping Review. *J Med Syst*. 2025; 49(1): 27. doi: 10.1007/s10916-025-02158-3.
13. Hadley E, Rhea S, Jones K, Li L, Stoner M, Bobashev G. Enhancing the prediction of hospitalization from a COVID-19 agent-based model: A Bayesian method for model parameter estimation. *PLoS One*. 2022; 17(3): e0264704. doi: 10.1371/journal.pone.0264704.
14. Lawson AB. Evaluation of predictive capability of Bayesian spatio-temporal models for Covid-19 spread. *BMC Med Res Methodol*. 2023; 23(1): 182. doi: 10.1186/s12874-023-01997-3.
15. Yun SJ, Kwon JW, Kim WT. A Novel Digital Twin Architecture with Similarity-Based Hybrid Modeling for Supporting Dependable Disaster Management Systems. *Sensors (Basel)*. 2022; 22(13): 4774. doi: 10.3390/s22134774.
16. Sun T, Lu J, Li Q, Kou Y. Can digital twin technology revolutionize public health emergency management? Insights from the PPRR framework. *Front Public Health*. 2025; 13: 1631339. doi: 10.3389/fpubh.2025.1631339.
17. Raab R, Küderle A, Zakreuskaya A, et al. Federated electronic health records for the European Health Data Space. *Lancet Digit Health*. 2023; 5(11): e840-e847. doi: 10.1016/S2589-7500(23)00156-5.
18. Sutton L, Tarrant C, Willars J, et al. How do staff work in NHS hospital operations management meetings to support resilience in everyday service delivery? A qualitative study. *BMC Health Serv Res*. 2025; 25(1): 113. doi: 10.1186/s12913-025-12229-3.
19. Rauner, M.S., Niessner, H., Odd, S, et al. An advanced decision support system for European disaster management: the feature of the skills taxonomy. *Cent Eur J Oper Res*. 2018; 26: 485-530. doi: 10.1007/s10100-018-0528-9.
20. Ханов А.М., Гусев А.В., Тюрганов А.Г. Искусственный интеллект в здравоохранении России: сбор и подготовка данных для машинного обучения // Российский журнал телемедицины и электронного здравоохранения. — 2023. — №9(4). — С.7-13. [Hanov AM, Gusev AV, Tyurganov AG. Iskusstvennyy intellekt v zdavoohranenii Rossii: sbor i podgotovka dannyh dlya mashinnogo obucheniya. *Rossijskij zhurnal telemeditsiny i elektronnoho zdavoohraneniya*. 2023; 9(4): 7-13. (In Russ.)] doi: 10.29188/2712-9217-2023-9-4-7-13.
21. Ваньков В.В., Артемова О.Р., Карпов О.Э. и др. Итоги внедрения искусственного интеллекта в здравоохранении России // Врач и информационные технологии. — 2024. — №3. — С.32-43. [Van'kov VV, Artemova OR, Karpov OE, et al. Itogi vnedreniya iskusstvennogo intellekta v zdavoohranenii Rossii. *Vrach i informacionnye tekhnologii*. 2024; 3: 32-43. (In Russ.)] doi: 10.25881/18110193_2024_3_32.
22. Портал оперативного взаимодействия ЕГИСЗ: сервис «РЭМД» (Реестр электронных медицинских документов). Доступно по: <https://portal.egisz.rosminzdrav.ru/services/remd> (дата обращения: 21.10.2025). [Portal operativnogo vzaimodejstviya EGISZ: servis «REMD» (Reestr elektronnyh medicinskih dokumentov). Available at: <https://portal.egisz.rosminzdrav.ru/services/remd> (21.10.2025). (In Russ.)]
23. Платформа искусственного интеллекта Минздрава России. Доступно по: <https://ai.minzdrav.gov.ru/> (дата обращения: 21.10.2025). [Platforma iskusstvennogo intellekta Minzdrava Rossii. Available at: <https://ai.minzdrav.gov.ru/> (21.10.2025). (In Russ.)]
24. Столбов А.П. О кибербезопасности медицинской деятельности // Вестник Росздравнадзора. — 2020. — №3. — С.44-52. [Stolbov AP. O kiberbezopasnosti medicinskoj deyatel'nosti. *Vestnik Roszdravnadzora*. 2020; 3: 44-52. (In Russ.)] doi: 10.35576/2070-7940-2020-3-44-52.

25. Столбов А.П. К вопросу об организации обезличивания и использования данных реальной клинической практики // Врач и информационные технологии. — 2025. — №2. — С.32-53. [Stolbov AP. K voprosu ob organizatsii obezlichivaniya i ispol'zovaniya dannyh real'noj klinicheskoy praktiki. Vrach i informacionnye tekhnologii. 2025; 2: 32-53. (In Russ.)] doi: 10.25881/18110193_2025_2_32.
26. Гусев А.В. Обзор российских систем поддержки принятия врачебных решений (СППВР) // Webiomed. Доступно по: <https://webiomed.ru/blog/obzor-rossiiskikh-sistem-podderzhki-prinyatiya-vrachebnykh-resheniy> (дата обращения: 11.08.2025). [Gusev AV. Obzor rossijskikh sistem podderzhki prinyatiya vrachebnykh reshenij (SPPVR). Webiomed. Available at: <https://webiomed.ru/blog/obzor-rossiiskikh-sistem-podderzhki-prinyatiya-vrachebnykh-resheniy> (11.08.2025). (In Russ.)]
27. Карпов О.Э., Никуличев А.А., Пензин О.В., Субботин С.А., Андриков Д.А., Перфильев А.Е. Архитектура медицинских информационных систем нового поколения // Вестник НМХЦ им. Н.И. Пирогова. — 2019. — №14(3). — С.126-134. [Karpov OE, Nikulichev AA, Penzin OV, Subbotin SA, Andrikov DA, Perfil'ev AE. Arhitektura medicinskih informacionnyh sistem novogo pokoleniya. Vestnik NMHC im. N.I. Pirogova. 2019; 14(3): 126-134. (In Russ.)] doi: 10.25881/BPNMSC.2019.43.34.025.