

Научная статья

УДК 614.2

doi:10.69541/NRIPH.2025.03.015

## Модели функционирования региональной системы здравоохранения при различных типах глобальных вызовов

Сергей Александрович Орлов

ФГБНУ «Национальный научно-исследовательский институт общественного здоровья  
имени Н. А. Семашко» Минобрнауки России, 105064, г. Москва, Российская Федерация

orlovsergio@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8749-8504>

**Аннотация:** в статье разработаны модели функционирования региональной системы здравоохранения в условиях чрезвычайных ситуаций на примере биологических вызовов и техногенных катастроф. Модели учитывают взаимодействие скорой медицинской помощи, стационаров, поликлиник и координационного центра, позволяют выявить проблемные зоны в организации процессов оказания медицинской помощи. В статье приведен комплекс количественных метрик, позволяющих оценить пропускную способность, укомплектованность ресурсами и гибкость системы здравоохранения. Полученные результаты доказывают эффективность системного подхода к управлению медицинскими ресурсами в условиях чрезвычайных ситуаций и могут использоваться как основа для создания программных продуктов мониторинга и планирования в здравоохранении.

**Ключевые слова:** биологические вызовы, моделирование, региональная система здравоохранения, ресурсы здравоохранения, техногенные катастрофы, чрезвычайные ситуации.

**Для цитирования:** Орлов С. А., Модели функционирования региональной системы здравоохранения при различных типах глобальных вызовов // Бюллетень Национального научно-исследовательского института общественного здоровья имени Н. А. Семашко. 2025. № 3. С. . doi:10.69541/NRIPH.2025.03.015.

Original article

## Models of regional healthcare system functioning under different types of global challenges

Sergey Aleksandrovich Orlov

N. A. Semashko National Research Institute of Public Health, 105064, Moscow, Russian Federation

orlovsergio@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8749-8504>

**Annotation:** The article presents models for the functioning of a regional healthcare system under emergency conditions, using the examples of biological threats and man-made disasters. The models take into account the interaction between emergency medical services, hospitals, outpatient clinics, and a coordination center, enabling the identification of problematic areas in the organization of medical care delivery processes. The article provides a set of quantitative metrics that allow for the assessment of throughput capacity, resource availability, and the flexibility of the healthcare system. The obtained results demonstrate the effectiveness of a systems-based approach to the management of medical resources in emergency situations and can serve as a foundation for the development of software products for healthcare monitoring and planning.

**Keywords:** biological challenges, modeling, regional healthcare system, healthcare resources, man-made disasters, emergencies.

**For citation:** Orlov S. A. Models of regional healthcare system functioning under different types of global challenges. *Bulletin of Semashko National Research Institute of Public Health.* 2025;(3):. (In Russ.). doi:10.69541/NRIPH.2025.03.015.

**Цель исследования.** Разработать модели функционирования региональной системы здравоохранения в условиях внешних вызовов на примере геополитических кризисов и техногенных катастроф с формализацией их ключевых показателей эффективности. Достижение поставленной цели создает основу для системного управления медицинскими ресурсами и выработки мер по адаптации системы здравоохранения к экстремальным условиям.

### Введение

Ежегодно система здравоохранения сталкивается с растущим числом чрезвычайных ситуаций разного

характера — от пандемий до масштабных техногенных аварий и геополитических кризисов. Эпидемии способны вызвать резкий наплыв пациентов, требующих изоляции и оказания специализированной медицинской помощи [1,2]. Техногенные катастрофы (аварии, террористические акты) приводят к одномоментному большому количеству пострадавших за короткий период времени [3,4]. Геополитические вызовы (военные конфликты, миграционные кризисы, санкции) приводят к разрыву логистических цепочек, привлечению медицинских организаций гражданской системы здравоохранения на помощь медицинской службе Минобороны России, увеличе-

нию нагрузки на региональную систему здравоохранения за счет пребывающих лиц, вынужденно покинувших места проживания в зоне боевых действий, а также пациентов с ранениями и травмами [5,6]. Эти ситуации различаются по природе, но все они требуют от системы здравоохранения высокой готовности, прочного запаса ресурсов и способности быстро трансформировать режим работы [7,8]. Традиционное планирование медицинской помощи в штатных условиях не учитывает экстремальные пики нагрузки и перераспределение ресурсов. Для повышения устойчивости системы здравоохранения необходим системный подход, предполагающий интеграцию и межведомственное взаимодействие на всех уровнях — от службы скорой медицинской помощи и первичного звена до специализированных стационаров и органов государственной власти, а также моделирование различных процессов, возникающих при чрезвычайных ситуациях [9,10].

### Материалы и методы

В ходе исследования применены методы структурного и математического моделирования, включавшие разработку блок-схем процессов реагирования системы здравоохранения на чрезвычайные ситуации биологического и техногенного характера. Схемы выполнены в нотации BPMN 2.0, позволяющей отразить взаимодействие различных участников (организаций) в рамках единого процесса. В качестве ключевых участников моделей выделены: служба скорой медицинской помощи, медицинские организации, оказывающие специализированную медицинскую помощь в стационарных условиях (больницы), амбулаторно-поликлинические учре-

ждения (поликлиника) и координационный центр (штаб) медицины катастроф. Для каждого из этих звеньев определены основные функции и действия на этапе чрезвычайной ситуации. Методы исследования опирались на инструментарий системного анализа и теории массового обслуживания. На базе разработанных BPMN-моделей формализованы метрики, характеризующие эффективность и устойчивость системы (пропускная способность, время отклика, укомплектованность ресурсами, гибкость). При выводе математических выражений использованы классические зависимости теории массового обслуживания, рассчитанные таким образом, чтобы их можно было интегрировать в имитационные модели (агентные или дискретно-событийные) для компьютерных экспериментов.

### Результаты

Разработаны две BPMN-модели, отражающие организацию работы региональной системы здравоохранения при чрезвычайных ситуациях разного типа. Первая модель описывает алгоритм действий при *биологическом вызове* (массовое инфекционное заболевание), вторая — при *техногенной катастрофе* с большим количеством пострадавших.

I. Основные элементы и этапы модели с ЧС, обусловленной биологическим вызовом (рис. 1):

Координационный штаб (центр медицины катастроф): при получении информации об угрозе инициирует план эпидемического реагирования, отслеживает развитие ситуации в регионе (мониторинг числа новых случаев, нагрузка на больницы и бригады скорой помощи), проводит периодическую оценку эффективности

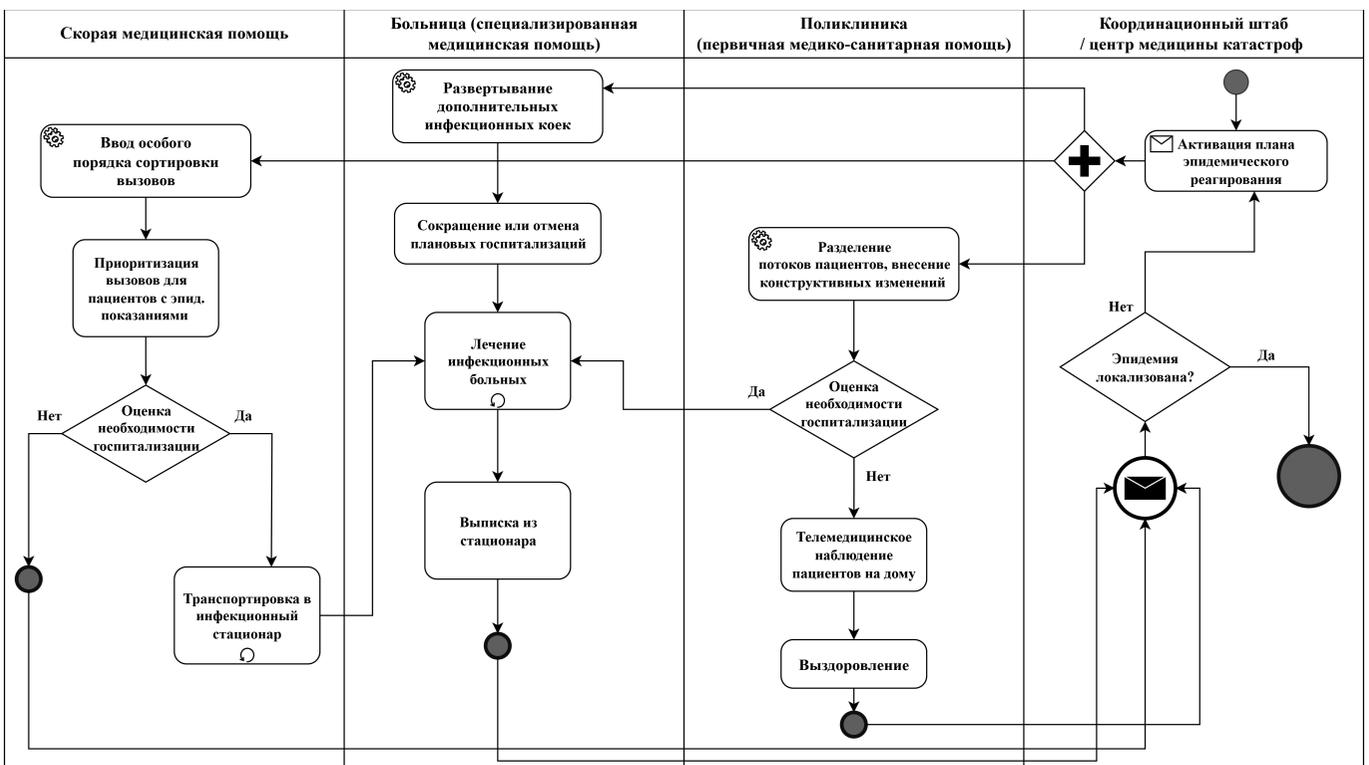


Рис. 1. BPMN-модель реагирования системы здравоохранения на биологические вызовы

принятых мер. Если наблюдается локализация эпидемии (замедление прироста новых случаев, достаточная свободная мощность коечного фонда), то чрезвычайный режим сворачивается и система здравоохранения возвращается к рутинной работе. Если же масштабы эпидемии продолжают увеличиваться, то координационный штаб проводит корректировку действий: усиливает ограничения, привлекает дополнительные ресурсы, перераспределяет потоки пациентов между медицинскими организациями, а цикл мониторинга повторяется до момента стабилизации обстановки.

**Скорая медицинская помощь:** работает по особому порядку сортировки вызовов с приоритетом пациентам с признаками инфекции. Далее производится первичная оценка состояния и необходимости госпитализации. Если по результатам оценки требуются стационарное лечение, бригада осуществляет транспортировку пациента в инфекционный стационар. В противном случае (если госпитализация не нужна) пациент получает рекомендации и остается под наблюдением на дому (с последующим подключением поликлиники для посещения пациента и дистанционного мониторинга).

**Больница (инфекционный стационар):** при угрозе эпидемии разворачиваются дополнительные инфекционные койки (за счет репрофилирования отделений или мобилизационного резерва). Одновременно сокращаются или временно приостанавливаются плановые госпитализации, чтобы освободить ресурсы. Больница обеспечивает лечение поступивших инфекционных больных согласно клиническим рекомендациям (протоколам лечения). После улучшения состояния пациентов организуется их выписка либо перевод на долечивание в амбулаторных условиях.

**Поликлиника (первичное звено):** переходит на особый режим разделения потоков пациентов: организуются отдельные входы для инфекционных больных, проводятся конструктивные изменения помещений (например, выделяются изолированные зоны ожидания). Врачебный персонал поликлиник усиливает работу по оценке необходимости госпитализации приходящих пациентов с подозрением на инфекцию. Пациенты с легким течением заболевания и без показаний к госпитализации остаются лечиться дома под наблюдением врача с использованием телемедицинских технологий до полного выздоровления.

**II. Основные элементы и этапы модели технологической ЧС:**

**Координационный штаб (центр медицины катастроф):** из единой дежурно-диспетчерской службы (МЧС России) в координационный центр здравоохранения поступает оповещение о ЧС. Штаб немедленно проводит экстренный сбор межведомственной комиссии, включающей от системы здравоохранения специалистов по различным направлениям (хирургия, служба крови, скорая медицинская помощь и др.). На основе информации о характере катастрофы и предпола-

гаемом числе пострадавших штаб координирует действия медицинских организаций: распределяет потоки пострадавших между стационарами, направляет бригады из соседних районов, при необходимости запрашивает подкрепление (например, из федеральных центров или у медицинской службы Минобороны России). В ходе ликвидации последствий штаб отслеживает ситуацию и при необходимости вносит соответствующие корректировки (например, перенаправляет потоки пациентов в случае перегрузки отдельных медицинских организаций). После завершения этапа оказания экстренной помощи проводится анализ эффективности, а система возвращается к рутинному функционированию.

**Скорая медицинская помощь:** при поступлении сообщения о массовом происшествии организуется массовый выезд бригад скорой медицинской помощи к месту события. На месте ЧС проводится медицинская сортировка пострадавших, оказывается первая помощь с дальнейшей транспортировкой в назначенные стационары. При этом передается информация о категориях пациентов (тяжелые, средние, легкие) ближайшим больницам для подготовки к их приему. Пострадавшие с незначительными травмами и ранениями, не требующими госпитализации, направляются на амбулаторное долечивание в поликлиники.

**Больница (стационарная помощь):** в рамках подготовки к приему большого числа пострадавших проводится категорирование стационаров (распределение больниц по профилю и уровню), для направления каждого пострадавшего в наиболее подходящий (например, тяжелых — в многопрофильную больницу с реанимацией, пациентов с ожогами — в ожоговый центр и т. д.). Больницы экстренно готовят операционные, места в реанимации и привлекают дополнительный медицинский персонал, отменяя плановые операции и консультации. Организуется массовый прием пострадавших: как только начинают поступать первые бригады скорой помощи с ранеными, дежурные бригады врачей проводят экстренные операции. При необходимости специалисты вызываются из других отделений или учреждений (мобилизация резерва кадров). После стабилизации состояния здоровья пациенты выписываются или переводятся на дальнейшую реабилитацию.

**Поликлиника (первичное звено):** при угрозе массовых поступлений формируют резерв медицинских работников. В резерв включаются специалисты, которых можно оперативно привлечь (в том числе из числа врачей общей практики, обучающихся медицинских вузов). Кроме того, поликлиники готовятся принять часть пострадавших: пациенты, не требующие стационарного лечения, обслуживаются амбулаторно, им назначается лечение и наблюдение в поликлинике по месту жительства после первичного осмотра и медицинской помощи, оказанной на месте ЧС. Тем самым снижается нагрузка на стационары.

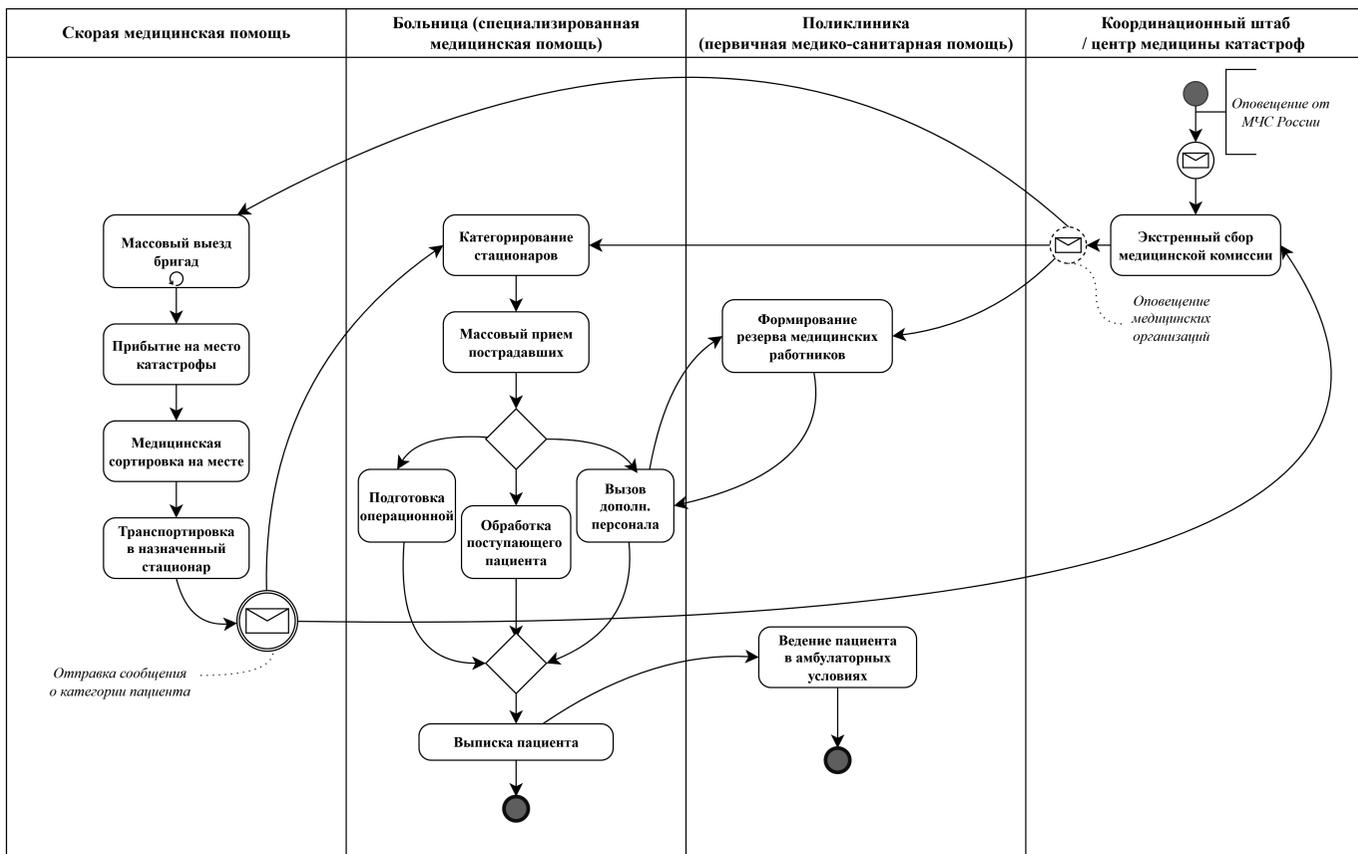


Рис. 2. BPMN-модель реагирования системы здравоохранения на техногенные вызовы

Обе предложенные модели демонстрируют четкую интеграцию и взаимосвязь различных уровней медицинской помощи: от первичного контакта (вызова скорой помощи) до специализированного лечения в условиях стационара и последующего амбулаторного наблюдения. Центральную роль в данных моделях играет координационный штаб (центр медицины катастроф), обеспечивающий согласованность действий и эффективный обмен информацией между всеми звеньями и этапами процесса оказания медицинской помощи. Алгоритмы заложены с учетом возможности быстрой перестройки: при изменении характера или масштаба угрозы схема реагирования оперативно адаптируется. Такой системный подход позволяет достичь баланса между интенсивным реагированием в острый период ЧС и плавным переходом к рутинному режиму после стабилизации обстановки.

Для количественной оценки возможностей здравоохранения в нормальном и чрезвычайном режимах разработан комплекс метрик, которые позволяют формально оценить, справится ли система здравоохранения с возросшей нагрузкой, насколько быстро она отреагирует и хватит ли ей ресурсов.

**1. Пропускная способность медицинских организаций.** Пропускная способность характеризует максимальный поток пациентов, который может обслужить медицинская организация за единицу времени. В стационарной помощи ограничивающим ресурсом выступает коечный фонд и длительность лечения.

Предельная пропускная способность стационара ( $C_{\text{стац.}}$ ) может быть рассчитана по формуле:

$$C_{\text{стац.}} = \frac{B}{L},$$

где  $B$  — число функционирующих коек;  $L$  — средняя длительность пребывания пациента на койке (дней).

Данная оценка следует из предположения полного оборота коечного фонда: каждая койка освобождается через  $L$  дней и ее сразу же занимает новый пациент. Например, если в больнице развернуто 300 коек, а средний срок лечения составляет 10 дней, то максимальная теоретическая пропускная способность составляет 30 пациентов в день (реально будет немного меньше из-за неравномерности поступления пациентов). Для амбулаторно-поликлинических учреждений и службы скорой помощи пропускная способность в первую очередь зависит от числа медработников и их индивидуальной продуктивности. Совокупная пропускная способность организации в единицу времени приблизительно равна:

$$C_{\text{амб./скор.}} = N \times \mu$$

где  $N$  — количество одновременно работающих специалистов (например, врачей-терапевтов на приеме в поликлинике или бригад скорой помощи на линии);  $\mu$  — средняя производительность одного специалиста (сколько пациентов в час он может принять, либо сколько вызовов в час обслуживает одна бригада);

Таким образом, увеличивая число одновременно работающих бригад или врачей ( $N$ ) или повышая их выработку ( $\mu$ ), можно нарастить поток пациентов, проходящих через систему в час или день.

## 2. Пропускная способность системы в целом.

Региональная система здравоохранения, как показано в моделях на рис. 1 и 2, вовлекается в оказание медицинской помощи на разных, последовательных этапах. Например, при биологическом вызове пациент последовательно проходит этап сортировки (вызов бригады скорой помощи), затем транспортировки, затем стационарного лечения. Общая пропускная способность цепочки таких этапов ограничена самым «узким местом». Формально, если пациенты должны пройти этапы 1, 2 и т. д., последовательно, пропускная способность всей системы определяется как:

$$C_{\text{сист.}} = \min(C_1, C_2, \dots, C_k),$$

где  $C_i$  — пропускная способность  $i$ -го этапа. В реальных условиях часть этапов может выполняться параллельно, потоки могут разветвляться (например, часть пациентов поступает через скорую, часть обращается в приемное отделение больницы самотеком), поэтому расчет  $C_{\text{сист.}}$  усложняется. Общим принципом остается поиск наиболее перегруженного ресурса, который лимитирует общий поток пациентов.

При ЧС за счет мобилизационных мер пропускную способность можно временно повысить. В стационарах увеличивают  $B$  (разворачивают дополнительные койки) и  $N$  (привлекают дополнительный медицинский персонал), а также стараются уменьшить  $L$  (например, через более раннюю выписку легких пациентов или их перевод на амбулаторное долечивание). Для оценки потенциала такого усиления вводится коэффициент повышения мощности ( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{C_{\text{экстр.}}}{C_{\text{норм.}}},$$

где  $C_{\text{норм.}}$  — пропускная способность в нормальных условиях, а  $C_{\text{экстр.}}$  — максимальная пропускная способность в чрезвычайных условиях. Например,  $\rho = 1,5$  означает, что систему удалось кратковременно перегрузить до 150% от ее обычной мощности. На практике планами расширения предусматривается возможность доведения коэффициент повышения мощности до 1,5—2 (150—200% от нормальной пропускной способности) в течение короткого периода без катастрофического снижения качества оказания медицинской помощи.

Следует учитывать, что вышеприведенные оценки пропускной способности статичны и не отражают динамики накопления очереди. Более точный подход требует моделирования системы массового обслуживания. Для стационаров может применяться, например, формула Литтла:

$$N = \lambda \cdot W$$

где  $N$  — среднее число пациентов, одновременно находящихся в стационаре (при 100% заполнении  $N$  приближается к  $B$ ),  $\lambda$  — средний входной поток па-

циентов (госпитализаций в день),  $W$  — среднее время пребывания пациента (дней). Эта формула связывает поток с занятостью коек и позволяет оценить, при каком  $\lambda$  стационар начнет переполняться ( $N$  станет равен  $B$ ). Для поликлиник и скорой помощи используются модели очередей типа «М/М/с» или их вариации, чтобы определить максимальную интенсивность вызовов, которую система выдержит без образования очереди.

Предельная пропускная способность системы, по сути, равна той наибольшей  $\lambda$ , при которой система еще способна стабильно обслуживать поступающих пациентов. Если интенсивность поступлений превышает этот порог, очередь (необслуженные вызовы) начнут неограниченно расти. Поэтому оценка  $C_{\text{сист.}}$  (предельно допустимого значения  $\lambda$ ) имеет критическую значимость для планирования мер при пиковых нагрузках.

## 3. Время отклика служб системы здравоохранения.

Время отклика является ключевым показателем оперативности реагирования системы, особенно для службы скорой медицинской помощи. Оно складывается из нескольких интервалов: времени реагирования на вызов, времени транспортировки пациента до медицинской организации и времени до начала оказания необходимой медицинской помощи. Для разных звеньев системы можно определить свои компоненты времени отклика.

Для скорой помощи стандартно измеряется интервал от момента поступления вызова до прибытия бригады на место. Эта величина ( $T_{\text{откл.}}(\text{скор.})$ ) складывается из времени на обработку вызова и диспетчеризацию ( $T_{\text{дисп.}}$ ), обычно 1—3 минуты), времени в пути до пациента ( $T_{\text{доезд.}}$ ) и времени на месте на оказание первой помощи и стабилизацию пациента: Наибольшая вариативность здесь связана с  $T_{\text{доезд.}}$ , которое зависит от расстояния до пациента и средней скорости движения. Для оптимизации суммарного  $T_{\text{откл.}}(\text{скор.})$  необходимо сокращать времени на обработку вызова и диспетчеризацию (например, за счет улучшения работы единой службы экстренных вызовов) и рационально размещать посты бригад скорой помощи по территории, чтобы среднее расстояние до вызова было минимально.

Для этапа транспортировки пострадавшего в стационар время отклика дополняется собственно временем транспортировки до больницы ( $T_{\text{трансп.}}$ ). Если на месте ЧС пациенту уже оказали медицинскую помощь, то  $T_{\text{трансп.}}$  — это время с момента выезда бригады скорой помощи с места до ее прибытия в приемное отделение. При прочих равных  $T_{\text{трансп.}}$  также пропорционально расстоянию до больницы. Однако грамотная маршрутизация и распределение пострадавших по ближайшим стационарам, способным принять пострадавших, способна значительно снизить этот показатель. Координационный штаб, направляя каждого пострадавшего в наиболее подходящую и ближайшую больницу, минимизирует общее время транспортировки.

Время до начала лечения в стационаре зависит от готовности больницы принять пациента. При массовом поступлении возможно увеличение времени ожидания начала оказания медицинской помощи. При одновременном поступлении  $n$  тяжелых пострадавших при наличии только  $m$  операционных (или бригад врачей), то часть пациентов вынуждена ждать своей очереди. Среднее время ожидания можно оценить, исходя из длительности операции  $T_{\text{опер.}}$  и количества пациентов, превышающих количество  $m$ . В реальности время до начала лечения стремятся сократить за счет увеличения числа дополнительных врачебных бригад (привлечения врачей из других отделений, круглосуточной работы операционных), тем самым уменьшая  $T_{\text{ожид.}}$ . Данный компонент отклика чрезвычайно важен в контексте оценки общей эффективности взаимодействия всех служб системы здравоохранения в условиях ЧС.

**4. Укомплектованность и обеспеченность ресурсами.** Под укомплектованностью понимается степень, в которой система обладает необходимыми ресурсами относительно потребности, особенно в условиях экстремального увеличения нагрузки. Для количественной оценки вводят коэффициенты обеспеченности ресурсами ( $K_{\text{рес.}}$ ):

$$K_{\text{рес.}} = \frac{R_{\text{текущ.}}}{R_{\text{необх.}}},$$

где  $R_{\text{текущ.}}$  — текущее наличие определенного ресурса (в абсолютных единицах, например число врачей определенного профиля, количество аппаратов ИВЛ, запас лекарств на складе и т. д.);  $R_{\text{необх.}}$  — рассчитанная потребность в этом ресурсе для нормального функционирования либо для текущего сценария ЧС.

Значение  $K_{\text{рес.}}$ , равное 1, означает, что ресурса имеется в требуемом количестве,  $K_{\text{рес.}} < 1$  означает дефицит (нехватку) ресурса, а  $K_{\text{рес.}} > 1$  показывает, что запас ресурса превышает минимальную потребность.

Для комплексной оценки вводится интегральный индекс обеспеченности ресурсами  $K_{\text{инт.}}$ , как средневзвешенное значение по основным видам ресурсов:

$$K_{\text{инт.}} = w_1 \frac{R_1}{R_1^{\text{необх}}} + w_2 \frac{R_2}{R_2^{\text{необх}}} + \dots + w_n \frac{R_n}{R_n^{\text{необх}}},$$

где  $w_i$  — весовой коэффициент значимости ресурса;  $R_i$  — наличие ресурса  $i$ -го типа;  $R_i^{\text{необх}}$  — потребность в ресурсе  $i$ -го типа.

Значение  $K_{\text{инт.}}$  ниже 1 означает, что система здравоохранения или медицинская организация не полностью обеспечены ключевыми ресурсами.

Помимо состояния обеспеченности, важно отслеживать напряженность использования ресурсов при ЧС. Для этого вводят показатель  $\omega$  — отношение фактического расхода ресурса к его доступному запасу за период нагрузки. Если  $\omega > 1$ , это означает, что потребность превысила наличие, и система столкнулась с нехваткой (пришлось отказывать пациентам или привлекать неза-

планированные ресурсы). Значения  $\omega$ , близкие к 1, свидетельствуют, что система работала на пределе возможностей по данному ресурсу.

**5. Гибкость перераспределения ресурсов и мощностей.** Адаптивность системы здравоохранения при смене режима работы характеризуется способностью быстро увеличивать одни мощности и сокращать другие без потери общего качества медицинской помощи. Можно выделить несколько критериев гибкости:

**Временной критерий гибкости.** Пусть  $T_{\text{базов.}}$  — время, которое есть в распоряжении системы до наступления пика нагрузки (например, время от обнаружения первых тревожных сигналов до массового наплыва пациентов), а  $T_{\text{моб.}}$  — время, необходимое для мобилизации ресурсов и трансформации системы (например, развертывания дополнительного госпиталя, созыва резервных бригад, перепрофилирования коек). Тогда временной критерий гибкости:

$$F_t = \frac{T_{\text{базов.}}}{T_{\text{моб.}}},$$

Если  $F_t$  равен 1, система успевает перестроиться к моменту пикового поступления пациентов. Если  $F_t < 1$ , требуется больше времени, и система не успевает вовремя нарастить мощности, что свидетельствует о недостаточной гибкости плана реагирования.

**Количественный критерий гибкости.** Оценивает долю ресурсов, которую можно быстро мобилизовать или перепрофилировать. Например, из  $X$  врачей различных специальностей  $Y$  могут быть в экстренном порядке переведены на другую работу (перераспределены на наиболее приоритетные участки). Тогда коэффициент:

$$F_q = \frac{Y}{X},$$

Чем больше значение данного коэффициента, тем гибче система. Высокое значение коэффициента означает, что значительная часть персонала имеет взаимозаменяемые навыки или готова к оперативному привлечению для решения экстренной задачи.

**Сценарный индекс гибкости.** Рассматривается ситуация перераспределения ресурсов между функциями при переходе в чрезвычайный режим функционирования. В исходном состоянии определенный ресурс (например, отделения и специалисты) были задействованы в рутинной деятельности  $R_{\text{исх.}}$ , а для выполнения новой приоритетной задачи необходимо  $R_{\text{нов.}}$ . Однако, не весь высвобождаемый ресурс может оказаться полезным в новых условиях, часть ресурса теряет эффективность из-за специфики чрезвычайной ситуации. Введем коэффициент эффективности перераспределения  $\alpha$  (от 0 до 1), показывающий, какая доля ресурса сохраняет полезность при переводе на другую задачу. Тогда условие покрытия новых потребностей за счет внутренних ресурсов можно выразить как:

$$\alpha R_{\text{исх.}} \geq R_{\text{нов.}}$$

Если это неравенство выполняется (эффективно переориентированного ресурса хватает), то система

справляется за счет внутренних резервов, а индекс гибкости по рассматриваемому сценарию близок к 1. Если же  $\alpha R_{\text{исх.}} \ll R_{\text{нов.}}$ , то значительная часть ресурса «теряется» при перепрофилировании и требуется привлечение внешней помощи, соответственно, гибкость по данному сценарию низкая (близка к 0). Для повышения значения  $\alpha$  реализуют меры по многофункциональной подготовке ресурсов, например, выбирается оборудование многоцелевого назначения, медицинский персонал проходит расширенное обучение для выполнения разных задач.

Перечисленные показатели могут быть интегрированы в общую модель мониторинга состояния системы здравоохранения. В имитационных экспериментах можно в реальном времени вычислять текущие коэффициенты нагрузки, оставшийся запас ресурсов и прогнозировать через какое время будут исчерпаны основные резервы при продолжении нагрузки. Это дает возможность заранее принять меры, предотвращающие коллапс системы здравоохранения. Таким образом, сочетание визуальных моделей процессов (BPMN) и формализованных метрик позволяет создать научно обоснованный инструментарий для управления региональной системой здравоохранения при любых чрезвычайных ситуациях.

### Обсуждение

Полученные результаты демонстрируют преимущества системного подхода к управлению ресурсами здравоохранения в экстремальных условиях. Предложенные BPMN-модели наглядно показывают, как различные медицинские организации взаимодействуют между собой под единым руководством координационного штаба. Такое представление полезно не только исследователям, но и организаторам здравоохранения: визуализация бизнес-процессов облегчает выявление слабых мест и дублирующих звеньев, требующих оптимизации. Например, из модели реагирования на биологический вызов видно, что критической точкой являются инфекционные стационары — их мощность лимитирует общий поток, поэтому заранее следует планировать увеличение коечного фонда и перепрофилирование больниц. В модели техногенной ЧС ключевым является этап сортировки и распределения пострадавших — сбой на этом этапе (например, недостаток бригад на месте происшествия) приведет к перегрузке ближайших больниц. Выявление таких особенностей позволяет разрабатывать превентивные меры: нормативы выезда бригад, планы перепрофилирования отделений, создание резервов оборудования и т. д.

Математические показатели, предложенные в статье, дополняют процессные модели и переводят качественные схемы в количественные расчеты. Важно отметить, что разработанные модели универсальны и могут быть интегрированы в симуляционные системы, в которых возможно экспериментировать с различными сценариями эпидемий и катастроф за счет изменения ключевых параметров (скорость распространения инфекции, число по-

страдавших, доступные ресурсы) и наблюдая, как система справляется в каждом из них. На основе таких экспериментов формируются рекомендации по улучшению.

Вместе с тем существуют определенные ограничения на применение подобных моделей, связанные с тем, что абстрактные модели зачастую упрощают реальность. Например, при расчете пропускной способности предполагается равномерный оборот коек, тогда как в реальности поступление пациентов может быть неравномерным и существует время простоя коек. Этот фактор был учтен в настоящем исследовании через теорию очередей, но для точности все равно требуется калибровка модели на эмпирических данных. Показатели гибкости также зачастую трудно оценить точно, так как многое зависит от управления и человеческого фактора, что является сложной задачей формализации. Тем не менее, даже приближенные оценки определяют стратегический вектор для планирования и уже сейчас очевидно, что комбинация качественных сценариев и количественных метрик может существенно повысить готовность системы здравоохранения, предоставив ее руководителям инструмент для принятия обоснованных управленческих решений.

### Заключение

В рамках исследования сформирован целостный взгляд на функционирование региональной системы здравоохранения в условиях чрезвычайных ситуаций, показано, как должна координироваться работа всех заинтересованных сторон. Разработан комплекс математических показателей, позволяющих количественно оценить ключевые свойства системы здравоохранения. Используя предложенные метрики, становится возможным выявление уязвимых мест в системе здравоохранения до наступления ЧС и их адресное устранение. Разработанные в ходе исследования модели и формулы для расчета показателей готовности системы здравоохранения к ответу на ЧС могут быть положены в основу программных продуктов для мониторинга и прогнозирования потребности в ресурсах, а также использованы при разработке нормативных правовых документов стратегического характера.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орлов С. А., Александрова О. Ю. Современные проблемы оценки готовности национальных систем здравоохранения к биологическим угрозам (литературный обзор). *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2024;(1):108—117. DOI: 10.25016/2541-7487-2024-0-1-108-117
2. Aminizadeh M, Farrokhi M, Ebadi A, Masoumi G, Kolivand P, Khankeh H. Hospital Preparedness Challenges in Biological Disasters: A Qualitative Study. *Disaster Med Public Health Prep*. 2022;16(3):956—960. DOI: 10.1017/dmp.2020.434
3. Göransson Nyberg A, Stricklin D, Sellström Å. Mass casualties and health care following the release of toxic chemicals or radioactive material — contribution of modern biotechnology. *Int J Environ Res Public Health*. 2011;8(12):4521—4549. DOI: 10.3390/ijerph8124521
4. Простакишин Г. П., Сарманаев С. Х., Аветисов Г. М. Основные недостатки и нерешенные вопросы ликвидации медико-санитарных последствий химических чрезвычайных ситуаций. *Медицина катастроф*. 2020;(4):28—32. DOI: 10.33266/2070-1004-2020-4-28-32

5. Gozlan A, Abuhasira R, Dreier J, et al. October 7th 2023 mass casualty incident in southern Israel: lessons for emergency preparedness and management. *Isr J Health Policy Res.* 2024;13(1):67. DOI: 10.1186/s13584-024-00651-7
6. Cantor D, Swartz J, Roberts B, et al. Understanding the health needs of internally displaced persons: A scoping review. *J Migr Health.* 2021;(4):100071. DOI: 10.1016/j.jmh.2021.100071
7. Hasan MK, Nasrullah SM, Quattrocchi A, Arcos González P, Castro Delgado R. Hospital Surge Capacity Preparedness in Disasters and Emergencies: Protocol for a Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(20):13437. DOI: 10.3390/ijerph192013437
8. Meyer D, Bishai D, Ravi SJ, et al. A checklist to improve health system resilience to infectious disease outbreaks and natural hazards. *BMJ Glob Health.* 2020;5(8):e002429. DOI: 10.1136/bmjgh-2020-002429
9. Emami SG, Lorenzoni V, Turchetti G. Towards Resilient Healthcare Systems: A Framework for Crisis Management. *Int J Environ Res Public Health.* 2024;21(3):286. DOI: 10.3390/ijerph21030286
10. Laker LF, Torabi E, France DJ, et al. Understanding Emergency Care Delivery Through Computer Simulation Modeling. *Acad Emerg Med.* 2018;25(2):116—127. DOI: 10.1111/acem.13272
- A Qualitative Study. *Disaster Med Public Health Prep.* 2022;16(3):956—960. DOI: 10.1017/dmp.2020.434
3. Göransson Nyberg A, Stricklin D, Sellström Å. Mass casualties and health care following the release of toxic chemicals or radioactive material — contribution of modern biotechnology. *Int J Environ Res Public Health.* 2011;8(12):4521—4549. DOI: 10.3390/ijerph8124521
4. Prostakishin G. P., Sarmanaev S. Kh., Avetisov G. M. Main Drawbacks and Unresolved Issues of Elimination of Medical and Sanitary Consequences of Chemical Emergencies. *Disaster Medicine. [Meditsina katastrof].* 2020;(4):28—32 (in Russian). DOI: 10.33266/2070-1004-2020-4-28-32
5. Gozlan A, Abuhasira R, Dreier J, et al. October 7th 2023 mass casualty incident in southern Israel: lessons for emergency preparedness and management. *Isr J Health Policy Res.* 2024;13(1):67. DOI: 10.1186/s13584-024-00651-7
6. Cantor D, Swartz J, Roberts B, et al. Understanding the health needs of internally displaced persons: A scoping review. *J Migr Health.* 2021;(4):100071. DOI: 10.1016/j.jmh.2021.100071
7. Hasan MK, Nasrullah SM, Quattrocchi A, Arcos González P, Castro Delgado R. Hospital Surge Capacity Preparedness in Disasters and Emergencies: Protocol for a Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(20):13437. DOI: 10.3390/ijerph192013437
8. Meyer D, Bishai D, Ravi SJ, et al. A checklist to improve health system resilience to infectious disease outbreaks and natural hazards. *BMJ Glob Health.* 2020;5(8):e002429. DOI: 10.1136/bmjgh-2020-002429
9. Emami SG, Lorenzoni V, Turchetti G. Towards Resilient Healthcare Systems: A Framework for Crisis Management. *Int J Environ Res Public Health.* 2024;21(3):286. DOI: 10.3390/ijerph21030286
10. Laker LF, Torabi E, France DJ, et al. Understanding Emergency Care Delivery Through Computer Simulation Modeling. *Acad Emerg Med.* 2018;25(2):116—127. DOI: 10.1111/acem.13272

## REFERENCES

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.07.2025; одобрена после рецензирования 20.08.2025; принята к публикации 15.09.2025.  
The article was submitted 08.07.2025; approved after reviewing 20.08.2025; accepted for publication 15.09.2025.