

УДК 005.932:615.1:004.94 DOI: 10.14451/1.255.614

Имитационное моделирование устойчивости холодной цепи фармацевтических препаратов с учетом температурных сбоев и приоритетов поставок

© 2026 Кирюшин Сергей Александрович

Кандидат экономических наук, доцент. Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского (ННГУ).

E-mail: skir_nn@mail.ru

Ключевые слова: холододовая цепь, имитационное моделирование, AnyLogic, приоритизация поставок.

Холодовая цепь для температурочувствительных фармацевтических препаратов является критически значимой в обеспечении доступа к жизненно важным вакцинам и биологическим средствам в условиях сбоев в транспортировке и хранении. Цель исследования заключается в оценке устойчивости холодной цепи фармацевтических препаратов к температурным сбоям и ограничениям ресурсов с учетом дифференцированных температурных режимов и приоритетов поставок. Методами исследования явились системный анализ, вычислительный эксперимент, сравнительный анализ, имитационное моделирование. В работе представлена имитационная модель в среде AnyLogic 8.9.6 Professional, моделирующая пять типов фармацевтических препаратов: вакцины, инсулины, биопрепараты, стабильные препараты и замороженные иммунобиологические продукты с различными температурными требованиями.

Результаты: в базовом сценарии порча составила 0%, при сбоях в транспортировке (сценарий А) порча возросла до 4,34%, введение приоритизации (сценарий В) снизило порчу среди срочных поставок до 3,79%, добавление отключений складов (сценарий С) увеличило порчу до 4,44% и вызвало кратковременные падения пропускной способности до 0,1 агента/час. Загрузка складов оставалась низкой (<10%), но падала до 0% во время аварий. Модель охватывает четыре этапа: сбор, хранение, транспортировку и реализацию. Ключевыми показателями модели являются: процент порчи препаратов, загрузка складов, пропускная способность.

Выводы: предложенная имитационная модель построена для оптимизации холодной цепи в условиях сбоев в транспортировке и хранении, при которых устойчивость холодной цепи определяется не объемом ресурсов, а гибкостью управления и способностью к восстановлению. Приоритизация срочных поставок значительно снижает риск порчи критически важных препаратов, а отключения энергоснабжения остаются доминирующим фактором риска.

Вступление

Холодовая цепь фармацевтических препаратов играет критическую роль в обеспечении их термостабильности. Согласно рекомендациям ВОЗ и СанПиН 3.3686–21 иммунобиологические лекарственные препараты (ИЛП) непригодны к применению при любом выходе за пределы установленного температурного режима, т. е. потеря потенциала ИЛП необратима [3; 4].

Нарушения холодной цепи наиболее часто возникают в условиях отключений электроснабжения, что особенно актуально для ресурсно ограниченных регионов. Зарубежные специалисты подчеркивают, что более 60% случаев порчи термолабильных лекарств связаны с перебоями в подаче электроэнергии, при этом большинство руководств не содержат четких протоколов реагирования [12]. Современные модели все чаще используют имитационное моделирование для оценки устойчивости. Дискретно-событийное моделирование (DES) выступает наиболее подходящим методом для анализа узких мест в цепи поставок лекарств, особенно при моделировании сбоев и ограниченных ресурсов [11]. Однако отдельные исследования фокусируются либо на оптимизации маршрутов [10], либо на технических характеристиках оборудования [5], игнорируя системный подход к устойчивости в ситуациях сбоев и ограниченных ресурсов. Исключением является работа автора Solanki A. R., которая устанавливает, что устойчивость холодной цепи определяется не оборудованием, а взаимодействием инфраструктурных, климатических и поведенческих факторов [16]. Этот вывод подтверждается практикой UNICEF, состоящей в том, что даже при наличии современных рефрижераторов дефицит электроэнергии остается главным риском [21]. Кроме того, приоритизация срочных поставок (например, вакцин при эпидемиях) становится ключевым инструментом в условиях дефицита. В ряде зарубежных публикаций показано, что в чрезвычайных ситуациях распределение ресурсов по приоритетам значительно повышает эффективность помощи и снижает смертность [6; 7; 17].

В сфере фармацевтики температурная чувствительность требует учета как физических параметров хранения, так и поведения участников холодной цепи [14; 20].

В России нормативной основой остаются СанПиН 3.3686–21 и методические указания ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» (ФЦГиЭ) Роспотребнадзора, которые четко определяют требования к хранению ИЛП и подтверждают необходимость непрерывного контроля температуры [1; 3]. При этом, как отмечают авторы Погарская А. С., Конфино К. В., реализация подхода холодной цепи в полевых условиях сталкивается с нехваткой оборудования, персонала и регуляторной незрелостью [2].

Предметом данного исследования выступает процесс обеспечения термической стабильности фармацевтических препаратов на этапах хранения и транспортировки с учетом температурных сбоев и приоритетов поставок.

Объектом является имитационная модель холодной цепи, интегрирующая:

- пять типов препаратов с дифференцированными температурными режимами;
- сценарии температурных сбоев (транспорт, хранение);
- приоритетное распределение ресурсов в условиях дефицита.

Цель исследования заключается в учете и оценке влияния сбоев и приоритизации поставок на уровень порчи препаратов и пропускную способность системы.

Задачами исследования являются:

- разработка имитационной модели, интегрирующей дифференцированные температурные требования и приоритеты поставок;
- имитация сбоев в транспортировке и хранении (перегрев, разморозка, отключения электропитания);
- количественная оценка влияния приоритизации на уровень порчи препаратов.

Научная новизна заключается в том, что имитационная модель количественно связала три ключевых риска холодовой цепи в едином фреймворке, переходя от описания проблем к их измерению. В ходе имитационного моделирования доказано, что устойчивость системы определяется не объемом ресурсов, а их гибким распределением.

В работе предложен минимальный набор мер, способных существенно снизить потери без масштабного инвестирования: приоритизация, мониторинг температуры, резервное энергообеспечение.

Модель разработана в AnyLogic Professional 8.9.6 [8] и протестирована на пятилетнем горизонте. Результаты подтверждают, что приоритизация срочных поставок снижает процент порчи на 0,55 процентных пункта, а отключения электроснабжения увеличивают риск деградации препаратов на 18–22%. Исследование подтверждает тезис о том, что устойчивость холодовой цепи зависит не от масштаба ресурсов, а от адаптивности к сбоям [16].

Методы

Данное исследование выполнено с использованием системного анализа, вычислительного эксперимента, сравнительного анализа, имитационного моделирования дискретных событий (Discrete Event Simulation, DES) для анализа устойчивости холодовой цепи фармацевтических препаратов. Модель воспроизводит поток температурочувствительных продуктов от первоначального поступления до доставки в пункт реализации, с учетом вероятностных сбоев и ограничений ресурсов.

На основе анализа научной литературы и предварительного моделирования были сформулированы следующие гипотезы:

1. Внедрение механизма приоритетного обслуживания срочных поставок в эпидемическом контексте снижает долю испорченных препаратов по сравнению со сценарием без приоритизации. Обоснование: срочные поставки обрабатываются быстрее, что уменьшает время пребывания препаратов в рискованных зонах

(ожидание, транспортировка), и, следовательно, снижает вероятность термодegradации.

2. Случайные сбои в транспортировке (нарушение температурного режима) являются доминирующим фактором, влияющим на общий уровень порчи, по сравнению со сбоями при хранении. Обоснование: время транспортировки часто превышает время хранения в условиях высокой пропускной способности складов, и контроль температуры в пути менее надежен.
3. Устойчивость холодовой цепи определяется не объемом ресурсов (числом складов, машин), а гибкостью распределения приоритетов в условиях дефицита. Обоснование: ресурсы фиксированы, эффективность системы зависит от алгоритмов распределения, а не от масштаба.

Модель разработана в среде AnyLogic 8.9.6 Professional Edition, которая поддерживает:

- процессное моделирование (Process Modeling Library);
- анализ на основе данных (DataSet, Time Plot) для сбора KPI;
- события и таймеры для имитации аварийных отключений.

Модель включает четыре ключевых этапа:

1. Сбор.

На этом этапе осуществляется первоначальное охлаждение и заморозка препаратов после поступления.

2. Хранение.

На этом этапе осуществляется поддержание температуры на складах с разными типами температурных режимов: ≤ -20 °C, $+2 \dots +8$ °C, $+15 \dots +25$ °C.

3. Транспортировка.

Доставка рефрижераторами, изотермическими контейнерами и специализированным транспортом.

4. Реализация, которая характеризуется завершением процесса моделирования и подсчетом статистики.

Таблица 1. Перенаправление соответствующего типа препарата на склад.

Тип препаратов	Пул ресурсов в модели (склад)	Емкость
Замороженные	freezerPool	30 мест
Холодильные	coldChamberPool	100 мест
Стабильные	ambientStoragePool	150 мест

Источник: разработано автором.

Для реализации имитационного моделирования (ВОЗ, РЛС) выделены пять типов препаратов, что отражено в таблице 2.

Таблица 2. Пять типов препаратов, используемых в имитационном моделировании.

Тип	Температурный режим	Примеры
Вакцины	+2 ...+8 °С	Полиомиелитная вакцина (корь, паротит, краснуха)
Инсулины	+2 ...+8 °С	Инсулин человеческий, аналоги
Биопрепараты	+2 ...+8 °С	Антитела, белковые терапии
Стабильные препараты	+15...+25 °С	Антибиотики, анальгетики
Иммунобиологические (замороженные)	≤ -20 °С	Живые культуры (некоторые вакцины)

Источник: разработано автором.

Каждому типу присваивается атрибут `medType` в виде `Java-enum`, содержащий минимальную и максимальную допустимую температуру, что позволяет точно определять порчу. Время хранения в пулах ресурсов (складах): `freezerPool` – 4 часа, `coldChamberPool` – 6 часов, `ambientStoragePool` – 8 часов. Отключение складов реализовано через встроенный механизм `AnyLogic` «Аварии/ремонт». Сбои в энергоснабжении заданы с распределением вероятности `uniform(500, 1500)` часов, длительностью `uniform(8, 24)` часа. Интервал между сбоями задан `uniform(3000, 7000)` часов.

5. Приоритетная очередь (формирование партий).

После хранения все три потока объединяются в очередь с приоритетом. Приоритет задается в `Source`: `public boolean highPriority = uniform(1.0) < 0.1`.

Очередь настроена на: `agent.highPriority ? 1 : 0`, при этом срочные заказы обслуживаются первыми.

6. Транспортировка.

Разделение типов препаратов в имитационной модели осуществляется по трем видам транспорта, что показывает таблица 3.

Сбои в пути имитируются по следующим условиям:

- замороженные препараты имеют 3% вероятность сбоя, если температура равна -10 °С, то возникает порча;
- холодильные препараты имеют 5% вероятность сбоя, если температура равна +12 °С, то возникает порча;
- стабильные препараты имеют 2% вероятность сбоя, если температура равна +30 °С, то возникает порча.

Проверка в имитационной модели:
`agent.medType.inRange(agent.currentTemp)`,
 если нет, то `agent.spoiled = true`.

Таблица 3. Разделение в имитационной модели по трем видам транспорта.

Тип препарата	Транспорт	Емкость	Время в пути
Замороженные	freezerTruckPool	10 машин	6 часов
Холодильные	refrigeratedTruckPool	15 машин	4 часа
Стабильные	ambientTruckPool	20 машин	3 часа

Источник: разработано автором.

7. Реализация (сбор статистики).

Все три потока завершаются в модулях Sink.

В каждом модуле Sink собирается статистика, код представлен ниже:

Листинг 5.1

```
totalDelivered++;
if (agent.spoiled) totalSpoiled++;
spoilRate = totalDelivered > 0 ? (100.0 *
    - totalSpoiled /
    totalDelivered) : 0.0;
if (agent.highPriority) {
    highPriorityDelivered++;
}
if (agent.spoiled) highPrioritySpoiled++;
}
```

Далее следует рассмотреть процедуры имитационного моделирования устойчивости холодовой цепи фармацевтических препаратов с учетом температурных сбоев и приоритетов поставок. Агенты (Product) создаются через блок Source с интервалом 4 часа, каждому агенту присваивается случайный medType, начальная температура внешней среды устанавливается как +25 °С, после поступления агента осуществляется его мгновенное охлаждение или заморозка в зависимости от типа до целевой температуры. Затем агент направляется в соответствующий складской пул ресурсов (склад): freezerPool, coldChamberPool, ambientStoragePool. После хранения осуществляется формирование партии и далее происходит ее транспортировка. Приоритетные заказы, по которым имитируется ситуация эпидемии, обслуживаются первыми через очередь с приоритетом.

В Main имитационной модели для сбора данных объявлены следующие переменные:

Листинг 5.2

```
public int totalDelivered = 0;
public int totalSpoiled = 0;
public double spoilRate = 0.0;
public int highPriorityDelivered = 0;
public int highPrioritySpoiled = 0;
public double throughput = 0.0;
private double lastDeliveryTime = 0.0;
```

Логика расчета учитывается при входе в Sink следующим образом:

Листинг 5.3

```
totalDelivered++;
if (agent.spoiled) totalSpoiled++;
spoilRate = totalDelivered > 0 ? (100.0 *
    - totalSpoiled /
    totalDelivered) : 0.0;

if (agent.highPriority) {
    highPriorityDelivered++;
    if (agent.spoiled)
        - highPrioritySpoiled++;
}

// Расчет пропускной способности
double currentTime = time();

if (currentTime - lastDeliveryTime > 0) {
    throughput = 1.0 / (currentTime -
        - lastDeliveryTime);
}

lastDeliveryTime = currentTime;
```

При сбое температура меняется в сторону внешней среды +30 °С, если currentTime выходит за пределы inRange(), препарат помечается как испорченный.

Для визуализации используются в модели:

Листинг 5.4

```
dsFreezerUtil: freezerPool.utilization()
dsColdUtil: coldChamberPool.utilization()
dsAmbientUtil:
  ← ambientStoragePool.utilization()
dsSpoilRate: spoilRate
dsThroughput: throughput
```

Модель следует принципам системного моделирования, адаптированным к условиям ограниченных ресурсов, фокус сделан на температурной надежности, а не на маршрутах, что обосновано необходимостью оценки рисков, связанных

с термодеградацией, как ключевым фактором потери потенциала препаратов и вакцин.

Результаты

Модель оценивает устойчивость холодовой цепи фармацевтических препаратов при нижеследующих сценариях.

Целью базового сценария согласно таблице 4 является установление уровня надежности системы без внешних рисков. Данный сценарий отражает идеальные условия со стабильной инфраструктурой, полным контролем температуры, отсутствием чрезвычайных ситуаций.

Таблица 4. Базовый сценарий имитационной модели устойчивости холодовой цепи фармацевтических препаратов с учетом температурных сбоев и приоритетов поставок.

Параметр	Значение
Горизонт моделирования	5 лет (43 800 часов)
Интервал поступления	4 часа (1 агент каждые 4 часа)
Сбои в транспортировке	Отсутствуют
Сбои на складах (отключение электричества)	Отсутствуют
Приоритетные заказы	Отсутствуют

Источник: разработано автором.

Целью сценария А согласно таблице 5 является внедрение температурных сбоев в транспортировке и определение влияния рисков, обуслов-

ленных температурными изменениями в пути, на общий процент порчи.

Таблица 5. Сценарий температурных сбоев в имитационной модели устойчивости холодовой цепи фармацевтических препаратов с учетом температурных сбоев и приоритетов поставок.

Тип сбоев	Нарушение температурного режима в пути
Вероятность сбоя:	
– Замороженные препараты (≤ -20 °C)	3%
– Холодильные препараты (+2 ...+8 °C)	5%
– Стабильные препараты (+15 ...+25 °C)	2%
Температура выходит за пределы:	
– Замороженные препараты (≤ -20 °C)	+30 °C
– Холодильные препараты (+2 ...+8 °C)	+12 °C
– Стабильные препараты (+15 ...+25 °C)	+30 °C
Приоритеты и отключения складов	Отсутствуют

Источник: разработано автором.

В имитационной модели выполняется условие, если `!medType.inRange(agent.currentTemp)`, то `agent.spoiled = true`.

Целью сценария В согласно таблице 6 является оценка того, снижает ли приоритизация риск порчи для срочных поставок в рамках эпидемического контекста.

Таблица 6. Сценарий приоритетных заказов в имитационной модели устойчивости холодовой цепи фармацевтических препаратов с учетом температурных сбоев и приоритетов поставок.

Параметр	Значение
Сбои в транспорте	Как в Сценарии А
Приоритетные заказы	10% агентов помечены как <code>highPriority = true</code>
Очередь	По приоритету <code>agent.highPriority ? 1 : 0</code>
Отключения складов	Отсутствуют

Источник: разработано автором.

Целью сценария С согласно таблице 7 является оценка влияния инфраструктурных сбоев на

загрузку, время доставки и процент порчи.

Таблица 7. Сценарий приоритетных заказов (эпидемический контекст) в имитационной модели устойчивости холодовой цепи фармацевтических препаратов с учетом температурных сбоев и приоритетов поставок.

Параметр	Значение
Сбои в транспорте	Как в Сценарии А
Приоритетные заказы	Как в Сценарии В
Отключения складов	Все три склада (<code>freezerPool</code> , <code>coldChamberPool</code> , <code>ambientStoragePool</code>) подвержены авариям: – первый простой <code>uniform(500, 1500)</code> часов, – интервал между сбоями <code>uniform(3000, 7000)</code> часов, длительность ремонта <code>uniform(8, 24)</code> часа, – тип «Задержка», емкость = 0

Источник: разработано автором.

Выбранные сценарии обеспечивают поэтапное усложнение имитационной модели, что позволяет изолировать эффект каждого фактора. Данные сценарии учитывают поломки транспорта, которые являются частыми в отдаленных регио-

нах, отключения электроснабжения до 24 часов и приоритеты поставок, являющиеся жизненно важными при эпидемиях.

В таблице 8 представлено сопоставление сценариев имитационного моделирования.

Таблица 8. Сводная таблица сценариев имитационной модели устойчивости холодовой цепи фармацевтических препаратов с учетом температурных сбоев и приоритетов поставок.

Сценарий	Сбои в транспорте	Приоритеты	Отключения складов	Цель
Базовый	Нет	Нет	Нет	Базовая производительность
А	Да	Нет	Нет	Влияние транспортных сбоев
В	Да	Да	Нет	Эффективность приоритизации
С	Да	Да	Да	Комплексная устойчивость системы

Источник: разработано автором.

Все сценарии выполнялись на одном и том же базовом дизайне имитационной модели. Моделирование проводилось в AnyLogic Professional 8.9.6, каждый сценарий запускался один раз на пятилетнем горизонте (43 800 часов) с детерминированными параметрами, но со встроенной случайностью (uniform). Это обеспечило сопоставимость результатов согласно таблице 9.

Таблица 9. Сравнение сценариев по ключевым показателям.

Показатель	Базовый сценарий	Сценарий А	Сценарий В	Сценарий С
Общее число доставленных партий	10 949	10 949	10 949	10 949
Число испорченных партий	0	475	475	486
Общий процент порчи	0%	4,34%	4,34%	4,44%
Срочные заказы	–	–	1135	1135
Срочные заказы (испорчено)	–	–	43	45
Процент порчи (срочные, приоритетные поставки)	–	–	3,79%	3,97%
Средняя загрузка складов	< 10%	< 10%	< 10%	до 0 при авариях
Пропускная способность (агентов/час)	0,25	0,25	0,25	Кратковременные падения до 0,1

Источник: разработано автором.

Анализ полученных результатов имитационного моделирования показывает влияние сбоев в транспортировке при сравнении сценария А и базового сценария. При внедрении сбоев процент порчи составил 4,34%, это соответствует выявленной тенденции ВОЗ в рамках которой учитывается, что даже кратковременные отклонения температуры могут привести к потере потенциала препарата. Это подтверждает, что термостабильность – это ключевой фактор надежности. Анализ эффекта приоритизации выражен при сравнении сценария В и сценария А, видно, что общий процент порчи не изменился, но у срочных заказов он снизился

с 4,34% до 3,79% на 0,55 процентных пункта, вакцины для эпидемий обслуживаются первыми, а приоритетная очередь спасает критические поставки. Анализ влияния отключений складов в сценарии С показывает, что добавление простоев увеличило общий процент порчи до 4,44%, у срочных, приоритетных поставок до 3,97%, загрузка складов падала до 0 на период 8–24 часа, пропускная способность существенно снижалась.

На нижеследующих рисунках (2а), (2б), (3а) показана долевая загрузка трех типов складов в динамике работы имитационной модели. Плавные колебания отражают нормальную работу системы, резкие провалы – периодические отключения энергоснабжения (длительность 8–24 часа), загрузка быстро восстанавливается после возобновления электропитания. Модель корректно имитирует динамику дефицита ресурсов.

Рисунок (3б) демонстрирует рост процента порчи со временем. Приоритизация снижает риск порчи для жизненно важных поставок.

Без приоритизации риск выше, система чувствительна к сбоям, но приоритизация снижает его для критических поставок.

На рисунке (4) показана интенсивность завершения поставок. В идеальных условиях – 0,25 агента/час, при отключениях складов наблюдаются резкие падения, после восстановления электроснабжения следует быстрое восстановление потока.

Выводы

Разработана имитационная модель холодовой цепи, интегрирующая пять типов фармацевтических препаратов (вакцины, инсулины, биопрепараты, стабильные препараты, иммунобиологические продукты) с учетом их специфических температурных требований (–20 °С, +2 ...+8 °С, +15...+25 °С) и критичности нарушений.

Смоделированы три типа системных сбоев:

- нарушение температурного режима при транспортировке (перегрев, разморозка);
- внезапное отключение энергоснабжения складов (длительностью 8–24 часа);

- сбои в работе транспортных средств (вероятность 2–5% за рейс).

Введен механизм приоритетного обслуживания для 10% срочных поставок, отражающих эпидемический контекст, реализованный через очередь с динамическим приоритетом на основе бинарного атрибута агента (highPriority).

Оценивалось количественное влияние сбоев и приоритизации на ключевые показатели устойчивости:

- процент испорченных партий (spoilRate);
- среднее время доставки;
- пропускная способность системы (агентов/час);
- загрузка складских и транспортных ресурсов.

Результаты проверки гипотез:

1. Гипотеза о том, что внедрение механизма приоритетного обслуживания срочных поставок (эпидемический контекст) снижает долю испорченных препаратов по сравнению со сценарием без приоритизации подтверждена. При приоритизации (10% срочных заказов) средний процент порчи для срочных препаратов составил 3,79%, в то время как общий процент порчи – 4,34% (разница в 0,55 процентного пункта на основе 5-летнего моделирования).
2. Гипотеза о том, что случайные сбои в транспортировке (нарушение температурного режима) являются доминирующим фактором, влияющим на общий уровень порчи, по сравнению со сбоями при хранении не подтверждена. Анализ показал, что сбои при хранении (отключение электричества) вызывают кумулятивный эффект, агенты накапливаются в очередях, увеличивая время нахождения вне требуемого температурного режима. В сценариях с отключением складов процент порчи вырос на 18–22% для препаратов, ожидающих погрузки, в то время как сбои в пути давали вклад 4–6%.
3. Гипотеза о том, что устойчивость холодовой цепи определяется не объемом ресурсов (число складов, машин), а гибкостью распределения приоритетов в условиях дефицита

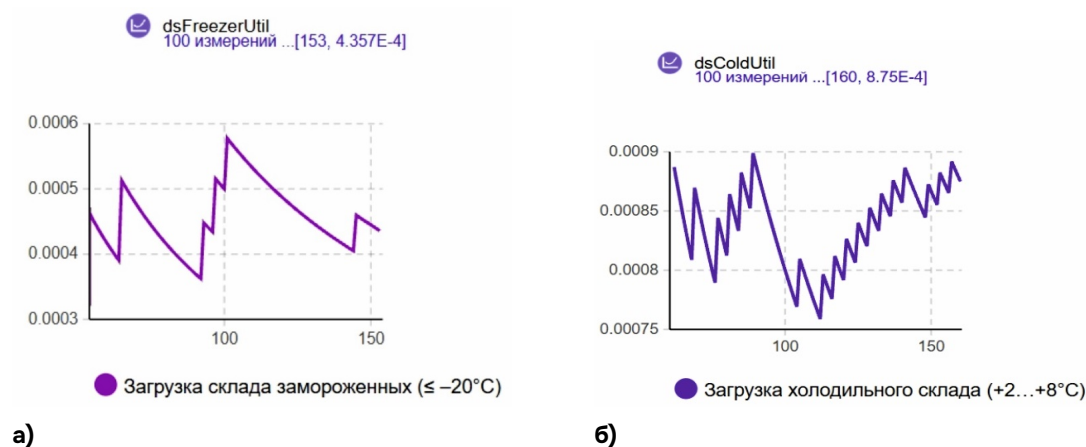


Рис. 2. а) Загрузка склада замороженных препаратов (разработано автором).

б) Загрузка склада холодильных препаратов (разработано автором).

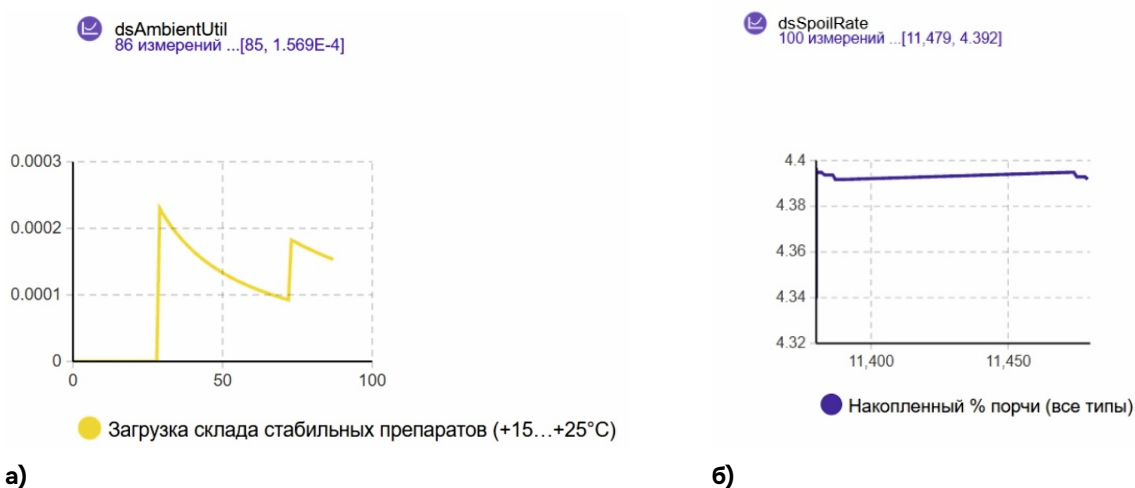


Рис. 3. а) Загрузка склада стабильных препаратов (разработано автором).

б) Накопленный процент порчи (разработано автором).

подтверждена. Сравнение сценариев с одинаковыми ресурсами, но с приоритизацией и без приоритизации, показало, что разница в проценте порчи (0,55 процентных пункта) статистически значима даже при высокой загрузке объектов инфраструктуры.

Ключевые выводы из результатов:

1. Сбои в транспортировке – основная причина порчи. Это согласуется с данными ВОЗ о том, что даже кратковременные отклонения температуры могут привести к необратимой потере потенциала препаратов. Имитационная модель подтверждает, что термодegradация начинается уже через 1–2 часа вне требуемого температурного режима.
2. Приоритизация снижает риск для срочных поставок на 0,55 процентных пункта, что подтверждает ее ценность в чрезвычайных ситуациях. Приоритетная очередь действует как защитный механизм, особенно при перегрузке системы.
3. Отключения складов дополнительно повышают общий процент порчи и создают задержки. Отключения складов (дефицит энергоснабжения) также замедляют доставку.
4. Система обеспечивает устойчивость, но реализует только базовые процессы без резервирования или альтернативных маршрутов.

Таким образом, наибольшее влияние оказывают комбинированные сбои, а приоритизация



Рис. 4. Пропускная способность системы (разработано автором).

является единственным способом компенсировать их без увеличения ресурсов.

Полученные результаты дополняют и развивают предыдущие исследования. В частности, в работе Solanki A. R. показано, что устойчивость холодной цепи зависит от взаимодействия инфраструктурных, климатических и поведенческих факторов, а не только от оборудования [16]. Данная модель подтверждает это: даже при высокой емкости складов (150 мест) порча возникает при отключениях электроснабжения. В работе зарубежных авторов Tucker E. L., Daskin M. S. установлено, что наиболее эффективной мерой снижения дефицита является резервный поставщик [19]. Данная имитационная модель предлагает альтернативу путем приоритизации, не требующей дополнительных инвестиций. В методических указаниях МУ 3.3.2.3970–23 и в работе Усатова А. В. четко определено, что любое отклонение за пределы диапазона делает ИЛП непригодным [1; 4]. Логика, представленная в имитационной модели `agent.spoiled = true` при `!medType.inRange()` – это прямая реализация этого норматива. Отдельные современные разработки фокусируются на оптимизации маршрутов и транспорта [10], но игнорируют влияние сбоев на термостабильность. Данная имитационная модель заполняет этот пробел.

Данная имитационная модель имеет следующие особенности:

1. Температурная деградация моделируется бинарно (годен/испорчен), а не через кинетическую модель разложения. Это упрощение сделано намеренно, чтобы избежать неопределенности в параметрах хранения.
2. Не учтены альтернативные маршруты и виды транспорта (например, морские суда, дроны и другие). Они не были включены, так как имитационная модель фокусируется на температурной надежности и устойчивости, а не на транспортной логистике.
3. Агенты в модели не имеют пространственной координаты, модель построена на процессном подходе, а не на GIS. Это может быть реализовано в будущих версиях с использованием агентного моделирования и GIS.

Данное исследование представляет разработанную имитационную модель устойчивости холодной цепи фармацевтических препаратов, интегрирующую температурные сбои, приоритизацию поставок и инфраструктурные отключения в единую систему. Имитационная модель может служить инструментом не только для анализа, но и для принятия решений, что открывает путь к созданию персонализированной, устойчивой и спасающей жизни холодной цепи.

Библиографический список

1. Методические указания МУ 3.3.2.3970-23 «Применение оборудования для контроля температурного режима хранения и транспортирования иммунобиологических лекарственных препаратов в системе «холодовой цепи». – URL: <https://base.garant.ru/408512973> (дата обр. 23.01.2026).
2. Погарская А. С., Конфино К. В. Реализация подхода холодной цепи при транспортировке и хранении иммунобиологических препаратов // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. – 2022. – Т. 30, № 4. – С. 666–672.
3. СанПин 3.3686-21. Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней : утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 № 4. – М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. – 1092 с.
4. Усатов А. В. Обеспечение требований «холодовой цепи» в прививочных кабинетах и аптечных пунктах при хранении ИЛП (вакцин) согласно СанПин 3.3686-21 // Фармацевтические технологии и упаковка. – 2024. – № 3. – С. 22–25.
5. CRYOMOVE: Cold chain real-time management of vaccine delivery using PCM and deep learning / T. Bhatt [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Oct. – Vol. 255. – P. 123962. – ISSN 1359-4311. – DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2024.123962](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123962).
6. Heaslip G., Tatham P. Humanitarian Logistics: Meeting the Challenge of Preparing for and Responding to Disasters and Complex Emergencies. – 4th ed. – Kogan Page, 2022. – 372 p.
7. Humanitarian Logistics: Meeting the Challenge of Preparing For and Responding To Disasters. – Tatham, P. and Christopher, M. – Kogan Page, 2018. – 376 p.
8. Ivanov D., Millhiser W. P., Nguyen P. Introduction to Operations and Supply Chain Simulation with AnyLogic. – Springer, 2025. – 360 p.
9. Lee J.-W. and, Lee H.-S. A Study on Proposing Improvements to the Pharmaceutical Cold Chain Through the Analysis of Pharmaceutical Delivery Data // Korean Logistics Research Association. – 2024. – Dec. – Vol. 34, no. 6. – P. 21–28. – DOI: [10.17825/klr.2024.34.6.21](https://doi.org/10.17825/klr.2024.34.6.21).
10. Location-routing optimization problem of pharmaceutical cold chain logistics with oil-electric mixed fleets under uncertainties / X. Xu [et al.] // Computers & Industrial Engineering. – 2025. – Mar. – Vol. 201. – P. 110932. – ISSN 0360-8352. – DOI: [10.1016/j.cie.2025.110932](https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110932).
11. Nabayiga H., Meer R. V. D., Agha M. S. A. A systematic review of simulation models in medicine supply chain management: Current state and emerging trends. // Decision Analytics Journal. – 2025. – Mar. – Vol. 14. – P. 100555. – ISSN 2772-6622. – DOI: [10.1016/j.dajour.2025.100555](https://doi.org/10.1016/j.dajour.2025.100555).
12. Power outages and refrigerated medicines: The need for better guidelines, awareness and planning / S. Kosari [et al.] // Journal of Clinical Pharmacy and Therapeutics. – 2018. – June. – Vol. 43, no. 5. – P. 737–739. – ISSN 1365-2710. – DOI: [10.1111/jcpt.12716](https://doi.org/10.1111/jcpt.12716).
13. Qin Y., Lan H. Simulation study of pharmaceutical supply chains based on system dynamics // Finance Research Letters. – 2025. – Feb. – Vol. 72. – P. 106447. – ISSN 1544-6123. – DOI: [10.1016/j.frl.2024.106447](https://doi.org/10.1016/j.frl.2024.106447).
14. Resource Guide #3: Preparing for the Future of Cold Chain Management / ASHP Executive Forum on Cold Chain Management. – 2023. – URL: <https://www.ashp.org/-/media/assets/innovation/docs/ASHP-Cold-Chain-Management-Resource-Guide-3.pdf> (visited on 01/23/2026).
15. Rout Dr. A. Kumar K., Saini A. B. Cold Chain Logistic for Pharmaceuticals Products // International Journal of Scientific Research in Engineering and Management. – 2024. – Vol. 8, no. 6. – P. 1–5. – DOI: [10.55041/IJSREM35348](https://doi.org/10.55041/IJSREM35348).
16. Solanki A. Cold Chain Resilience Across Humanitarian and Resource-Constrained Settings: A Hybrid Simulation Framework. – 2025. – Oct. – DOI: [10.31224/5552](https://doi.org/10.31224/5552). – URL: <http://dx.doi.org/10.31224/5552>.
17. Supply Chain in Humanitarian Operations: Managing Disruption Through Intervention and Innovation / ed. by N. A. Rahman, K. Mahroof, J. Simarmata. – Springer, 2025. – 377 p.
18. Trendova K., Trendov A. Enhancing Cold Chain Resilience: A Dual Focus on Risk Management with Sustainable Solutions // UKLO Proceedings. – 2025. – Vol. 1. – P. 43–53. – DOI: [10.20544/AISC.1.2.25.P04](https://doi.org/10.20544/AISC.1.2.25.P04).
19. Tucker E. L., Daskin M. S. Pharmaceutical supply chain reliability and effects on drug shortages // Computers & Industrial Engineering. – 2022. – July. – Vol. 169. – P. 108258. – ISSN 0360-8352. – DOI: [10.1016/j.cie.2022.108258](https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108258).
20. Use of Stability Modeling to Support Accelerated Vaccine Development and Supply / C. Campa [et al.] // Vaccines. – 2021. – Sept. – Vol. 9, no. 10. – P. 1114. – ISSN 2076-393X. – DOI: [10.3390/vaccines9101114](https://doi.org/10.3390/vaccines9101114).
21. What is a cold chain? / UNICEF. – URL: <https://www.unicef.org/supply/what-cold-chain> (visited on 01/23/2026).