
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Научная статья

УДК 53.089.6+352/354-1; DOI: 10.61260/2218-13X-2026-1-10-21

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЦЕНТРОВ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ МЧС РОССИИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКАХ ЗАЯВОК

✉ Гарелина Светлана Александровна;

Любкин Роман Николаевич.

АГЗ МЧС России им. генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, Москва, Россия

✉ rolru@mail.ru

Аннотация. Представлен математический аппарат оптимизации функционирования федерального казённого учреждения «Центр материально-технического и метрологического обеспечения МЧС России» по поверке средств измерений радиационного излучения и ядерных констант МЧС России в условиях выраженной нестационарности входных потоков заявок. Показано, что сезонные колебания интенсивности поступления приборов приводят к резкому увеличению времени ожидания в очереди и значительному росту периода отсутствия средств измерений в эксплуатации, что негативно влияет как на оперативность аварийно-спасательных работ, так и на непрерывность радиационного мониторинга. Для формализации процессов функционирования центров поверки используется многоканальная модель массового обслуживания типа G/G/C, позволяющая количественно оценивать влияние коэффициента загрузки на динамику очередей. В модели учитывается структура входного потока, различия типов приборов по трудоёмкости поверки, транспортные задержки и ограниченная пропускная способность поверочных установок. Ущерб от отсутствия приборов представлен двумя независимыми компонентами: экспоненциальной, характеризующей рост риска при задержках выполнения аварийно-спасательных работ, и линейной, отражающей снижение эффективности радиационного мониторинга. На основе полученных зависимостей сформулирована задача минимизации совокупных потерь, включающих ущерб от отсутствия средств измерений и затраты на передачу части приборов во внешние коммерческие организации. Определено оптимальное значение доли перераспределения заявок, обеспечивающее минимизацию общих потерь при условии обеспечения устойчивости работы федерального казённого учреждения «Центр материально-технического и метрологического обеспечения МЧС России». Предложенный математический аппарат может использоваться для планирования поверочных работ, расчёта потребности в коммерческих услугах, оценки рисков снижения метрологической готовности и повышения устойчивости системы радиационной безопасности МЧС России.

Ключевые слова: средства измерений, поверка, аварийно-спасательные работы, мониторинг, система массового обслуживания, оптимизация, интенсивность обслуживания, устойчивость системы

Для цитирования: Гарелина С.А., Любкин Р.Н. Математический аппарат оптимизации функционирования центров поверки средств измерений МЧС России при нестационарных потоках заявок // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2026. № 1. С. 10–21. DOI: 10.61260/2218-13X-2026-1-10-21

Scientific article

MATHEMATICAL APPARATUS FOR OPTIMIZING THE FUNCTIONING OF THE CENTERS FOR VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS OF EMERCOM OF RUSSIA IN CASE OF NON-STATIONARY FLOWS OF APPLICATIONS

✉Garelina Svetlana A.;

Lyubkin Roman N.

The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia named after Lieutenant General D.I. Mikhaylik, Moscow, Russia

✉rolru@mail.ru

Abstract. The paper presents a mathematical apparatus for optimizing the functioning of the Federal State Institution «Center for Material, Technical and Metrological Support of the Ministry of EMERCOM of Russia» for verifying radiation measuring instruments and nuclear constants EMERCOM of Russia in conditions of pronounced instability of the input streams of applications. It is shown that seasonal fluctuations in the intensity of instrument intake lead to a sharp increase in waiting time in the queue and a significant increase in the period of absence of measuring instruments in operation, which negatively affects both the efficiency of emergency rescue operations and the continuity of radiation monitoring. To formalize the functioning of the verification centers, a multi-channel queuing model of the G/G/C type is used, which makes it possible to quantify the impact of the load factor on queue dynamics. The model takes into account the structure of the input stream, differences in the types of devices in terms of the complexity of verification, transport delays and the limited capacity of the verification facilities. The damage caused by the lack of instruments is represented by two independent components: exponential, which characterizes an increase in risk during delays in emergency rescue operations, and linear, reflecting a decrease in the effectiveness of radiation monitoring. Based on the obtained dependencies, the task of minimizing cumulative losses is formulated, including damage from the lack of measuring instruments and the cost of transferring some of the instruments to external commercial organizations. The optimal value of the share of the redistribution of applications has been determined, ensuring the minimization of total losses, while ensuring the sustainability of the work of the Federal State Institution «Center for Logistics and Metrological Support of EMERCOM of Russia». The proposed mathematical apparatus can be used to plan verification work, calculate the need for commercial services, assess the risks of reducing metrological readiness and increasing the stability of the radiation safety system of EMERCOM of Russia.

Keywords: measuring instruments, verification, rescue operations, monitoring, queuing system, optimization, maintenance intensity, system stability

For citation: Garelina S.A., Lyubkin R.N. Mathematical apparatus for optimizing the functioning of the centers for verification of measuring instruments of EMERCOM of Russia in case of non-stationary flows of applications // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2026. № 1. P. 10–21. DOI: 10.61260/2218-13X-2026-1-10-21

Введение

Средства измерений (далее СИ) радиационного излучения и ядерных констант используются в деятельности МЧС России по двум основным направлениям:

– при выполнении аварийно-спасательных работ (АСР) радиационного характера, где СИ обеспечивают оперативное получение измерительной информации, необходимой для оценки радиационной обстановки и принятия решений по обеспечению безопасности личного состава [1];

– в системах регулярного радиационного мониторинга территорий, объектов повышенной опасности и окружающей среды, где СИ применяются для получения данных об уровнях ионизирующего излучения в штатных и потенциально опасных условиях [2, 3].

Недостаточная доступность СИ при проведении АСР приводит к увеличению времени реагирования подразделений вследствие необходимости ожидания или перераспределения приборов. Изъятие СИ на поверку, в свою очередь, приводит к снижению эффективности радиационного мониторинга за счёт уменьшения доли контролируемых объектов и территорий. Несмотря на различие функционального назначения, оба направления применения СИ объединяет необходимость поддержания полноценного метрологического обеспечения, включающего своевременную поверку как элемент обеспечения единства и требуемой точности измерений.

Организация поверки СИ радиационного излучения и ядерных констант имеет ряд специфических особенностей [4]. В отличие от СИ давления и вакуума, поверяемых на местах силами подразделений выездных метрологических¹ групп и характеризующихся относительно равномерным графиком поступления заявок, поверка радиационных приборов централизована и выполняется исключительно в ФКУ «Центр материально-технического и метрологического обеспечения МЧС России» (Центр МТМО). Для данных СИ требуются специализированные эталонные источники, сложные методики поверки и высокая квалификация персонала [5], что обуславливает значительную нагрузку Центра МТМО и делает его особенно чувствительным к неравномерности входного потока заявок.

Анализ функционирования Центра МТМО показал, что месячный объём поступающих на поверку приборов может изменяться более чем в десять раз, формируя выраженную сезонную нестационарность. В периоды пиковых нагрузок это приводит к существенному росту очередей, увеличению времени поверки и длительному отсутствию приборов в эксплуатации. Поскольку в период изъятия СИ проведение измерений невозможно, возрастает вероятность пропуска опасных тенденций и повышается риск несвоевременного принятия решений при выполнении АСР. Таким образом, неравномерность входных потоков СИ напрямую определяет величину потенциального ущерба при авариях и чрезвычайных ситуациях (ЧС).

В сложившихся условиях неравномерности поступления заявок на поверку возможности административного выравнивания входного потока заявок существенно ограничены. В этой связи одним из немногих практически реализуемых инструментов снижения пиковых нагрузок на Центр МТМО является перераспределение части СИ на поверку во внешние коммерческие организации. Однако такая мера сопряжена с дополнительными финансовыми затратами, что обуславливает необходимость поиска оптимального соотношения между стоимостью коммерческой поверки и потенциальным ущербом, связанным с увеличением времени отсутствия приборов в эксплуатации.

Математический аппарат теории массового обслуживания [6, 7] позволяет формализовать влияние нестационарного входного потока заявок на время ожидания и формирование очередей, тогда как риск-ориентированный подход обеспечивает аналитическое представление потенциального ущерба, обусловленного снижением доступности СИ. Совмещение данных методов позволяет построить математическую модель совокупных потерь, включающую как ущерб от снижения доступности СИ (в том числе риски пропуска опасных радиационных тенденций и увеличение времени выполнения АСР), так и затраты на перераспределение части приборов в коммерческие организации, а также определить оптимальную стратегию распределения заявок.

¹ Об утверждении Руководства по обеспечению единства измерений в Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий: приказ МЧС России от 30 нояб. 2021 г. № 833. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».

Выбор и обоснование математической модели функционирования Центра МТМО

Центр МТМО представляет собой систему массового обслуживания (СМО). Компоненты СМО [6–8]:

1. Поток заявок – последовательность событий, при которых заявки поступают в систему.
2. Обслуживающие устройства – элементы системы, которые обрабатывают заявки.
3. Буфер – место для хранения заявок, ожидающих обслуживания.
4. Стратегия обслуживания – порядок, в котором заявки выбираются для обслуживания (например, FIFO – «первый пришёл, первый обслужен»).

Некоторые особенности:

- если количество заявок меньше C , некоторые устройства простаивают;
- если количество заявок больше C , задания помещаются в очередь в буфере. Буфер имеет бесконечный размер, поэтому нет ограничений на количество заявок, которые он может содержать.

Система массового обслуживания типа $G/G/C$ – это математическая модель, которая описывает систему с произвольным (неэкспоненциальным) временем обслуживания и произвольным числом параллельных обслуживающих устройств. Обозначение $G/G/C$ расшифровывается: G – произвольное время обслуживания; C – число обслуживающих устройств. Такая модель учитывает, что время обслуживания заявок в каналах может быть распределено по произвольному закону, что делает её более гибкой в моделировании реальных систем.

Принцип работы. В СМО заявка, поступившая на вход, может находиться в двух состояниях:

1. В состоянии обслуживания – в обслуживающем устройстве.
2. В состоянии ожидания – в накопителе (буфере), если все устройства заняты обслуживанием других заявок.

После завершения обслуживания очередной заявки из накопителя выбирается следующая заявка в соответствии с заданной дисциплиной обслуживания.

Некоторые особенности модели:

- простейший поток заявок – независимые случайные величины.
- случайное время обслуживания – время нахождения заявки в устройстве.
- накопитель неограниченной ёмкости – отсутствие отказов поступающим заявкам при их постановке в очередь, то есть любая поступающая заявка всегда найдёт в накопителе место для ожидания независимо от того, сколько заявок уже находится в очереди.

Для исследования сложных систем, для которых непосредственное применение теории СМО затруднительно, используют имитационное моделирование, которое позволяет получить приблизительные оценки параметров, причём с увеличением длительности моделирования они приближаются к теоретическим значениям.

Целью настоящей работы является оптимизация функционирования Центра МТМО в условиях нестационарных потоков заявок. Предлагаемое решение учитывает структуру входного потока, вариативность времени поверки различных типов СИ, транспортные задержки, ограничения пропускной способности и специфическую природу рисков, возникающих при отсутствии приборов в эксплуатации.

Пусть в месяце t поступает N_m СИ, тогда интенсивность входного потока в месяц:

$$\lambda_m = \frac{N_m}{T_m},$$

где T_m – фонд рабочего времени (в часах).

Входной поток СИ является неоднородным и включает множество типов приборов, существенно различающихся по трудоёмкости и длительности поверки. Пусть в рассматриваемом месяце имеется K типов СИ, для каждого из которых известны количество поступивших приборов n_i и время поверки t_i , определяемое регламентом и используемыми эталонными источниками. Тогда доля приборов типа i в общем потоке равна

$$p_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^K n_i}.$$

Среднее время обслуживания одной заявки определяется взвешенной суммой длительностей поверки по всем типам СИ

$$E[S] = \sum_{i=1}^K p_i t_i.$$

Коэффициент загрузки поверочных установок в месяце m определяется как отношение интенсивности входного потока к совокупной пропускной способности C параллельно работающих установок

$$\rho_m = \frac{\lambda_m E[S]}{C}.$$

Условие устойчивости системы: $\rho_m < 1$. При ρ_m , близком к единице, система переходит в режим перегрузки, что в реальной практике Центра МТМО проявляется в виде резкого увеличения сроков поверки и многомесячного накопления необслуженных приборов в периоды сезонных пиков.

Среднее время ожидания в очереди для системы типа G/G/C оценивается приближённой формулой, полученной путём умножения классического выражения Эрланга C для M/M/C системы на вариационный множитель Кингмана для учёта коэффициентов вариации межприбытия и времени обслуживания

$$W_{q,m} \approx \frac{P_{ож}}{C(1 - \rho_m)} \frac{C_{\alpha,m}^2 + C_s^2}{2} E[S], \quad (1)$$

где $C_{\alpha,m}^2$ – коэффициент вариации межприходных интервалов; C_s^2 – коэффициент вариации времени обслуживания; $P_{ож}$ – вероятность того, что поступивший прибор застанет все C установок занятыми.

Данная аппроксимация показывает, что даже при наличии нескольких каналов обслуживания среднее время ожидания растёт нелинейно при приближении ρ_m к единице. Именно этот эффект приводит к лавинообразному увеличению времени поверки в периоды пиковых нагрузок, что согласуется с наблюдаемыми задержками в работе Центра МТМО.

Полное время отсутствия СИ в эксплуатации определяется суммой времени ожидания в очереди, времени поверки и транспортных задержек

$$\tau_m = W_{q,m} + E[S] + 2t_{дост}.$$

Именно величина τ_m определяет объём потерь, связанных с отсутствием прибора при выполнении АСР или нарушении режимов радиационного мониторинга.

Величина τ_m напрямую влияет на риски, возникающие в процессе радиационного мониторинга и проведения АСР. Эти риски имеют различную природу, поэтому представляются двумя независимыми механизмами ущерба, каждый из которых обладает собственным законом роста.

1. Ущерб, связанный с увеличением времени АСР. При снижении числа доступных и работоспособных СИ возрастает время проведения АСР, что приводит к более длительному воздействию поражающих факторов. В работах [9, 10] показано, что зависимость ущерба от увеличения времени реагирования носит резко нелинейный характер: даже небольшое удлинение времени готовности приводит к экспоненциальному росту вероятности расширения зоны поражения и величины прямых и косвенных потерь. По этой причине данная составляющая ущерба описывается экспоненциальной функцией времени отсутствия СИ:

$$U_m^{\text{АСР}}(\tau_m) = U_0 e^{\gamma \tau_m}, \quad (2)$$

где U_0 – ущерб, если бы все СИ были в работе; γ – параметр чувствительности ущерба ко времени задержки.

2. Ущерб, связанный со снижением эффективности радиационного мониторинга. По мере увеличения длительности отсутствия СИ происходит накопление неопределённости относительно текущей и изменяющейся радиационной обстановки, возрастает вероятность позднего выявления опасных тенденций и недооценки уровня радиационных рисков. В рамках настоящей работы, ориентированной прежде всего на оптимизацию функционирования центров поверки, для описания мониторинговой компоненты используется линеаризованная модель, отражающая среднее ожидаемое поведение системы при умеренных интервалах отсутствия приборов. Вводится коэффициент α_m , характеризующий удельный ущерб от отсутствия типового СИ в эксплуатации (руб./сут) в месяце m . Тогда дополнительный ущерб, обусловленный снижением эффективности радиационного мониторинга из-за изъятия СИ на время τ_m , записывается в виде:

$$U_m^{\text{МОН}}(\tau_m) = \alpha_m \tau_m. \quad (3)$$

Такой подход позволяет избежать излишнего усложнения при построении интегральной оптимизационной модели, сосредоточив внимание на влиянии нестационарных потоков заявок и параметров функционирования Центра МТМО.

Таким образом, суммарный ущерб, формируемый за счёт отсутствия СИ, имеет двойственную природу: экспоненциальную компоненту, связанную со сроками реагирования АСР (2), и линейную компоненту, связанную с потерей мониторинговых данных (3). В рамках настоящей работы эти механизмы учитываются в обобщённой функции $U_m(\tau_m)$, монотонно возрастающей по времени отсутствия прибора и отражающей совокупный риск для функционирования системы радиационной безопасности

$$U_m(\tau_m) = U_m^{\text{АСР}}(\tau_m) + U_m^{\text{МОН}}(\tau_m).$$

Поскольку Центр МТМО обладает фиксированной пропускной способностью обслуживаемых установок и не может оперативно увеличивать их число в пиковые месяцы, одним из немногих практически реализуемых инструментов регулирования нагрузки является передача части СИ на поверку во внешние коммерческие организации. Через $x_{m,i}$ обозначена доля приборов i -го типа, направляемых в коммерческие лаборатории в месяце m . Агрегированная доля приборов, перераспределяемых во внешние организации, определяется как

$$x_m = \sum_{i=1}^K p_i x_{m,i}.$$

Данное выражение представляет собой средневзвешенную по структуре входного потока долю приборов, направляемых на поверку во внешние организации. Тогда интенсивность потока, поступающего непосредственно в Центр МТМО, определяется

выражением $\lambda_m^{\text{II}} = (1 - x_m)\lambda_m$. Поскольку перераспределение приборов во внешние организации может осуществляться неоднородно по типам СИ, далее используется вектор перераспределения:

$$X_m = \{x_{m,1}, \dots, x_{m,K}\}.$$

При этом коэффициент загрузки многоканальной системы из S поверочных установок принимает вид

$$\rho_m(X_m) = \lambda_m^{\text{II}} E[S]/C.$$

Увеличение доли перераспределения x_m линейно снижает величину ρ_m , что приводит к сокращению среднего времени ожидания в очереди $W_{q,m}(X_m)$. Согласно обобщённой аппроксимации (1) для системы типа G/G/C, время ожидания возрастает нелинейно при приближении ρ_m к единице, поэтому даже небольшое уменьшение загрузки может приводить к значительному сокращению временных задержек. Таким образом, управление вектором перераспределения X_m позволяет целенаправленно уменьшать полное время отсутствия СИ в эксплуатации $\tau_m(X_m)$ и, следовательно, снижать величину потенциального ущерба, обусловленного изъятием приборов из процесса радиационного контроля и выполнения АСР.

Передача части СИ на поверку в коммерческие организации приводит к дополнительным расходам

$$Z_m(X_m) = \sum_{i=1}^K x_{m,i} n_i z_i,$$

где z_i – стоимость поверки одного прибора во внешней организации.

Для обеспечения аналитической наглядности и исключения избыточного усложнения модели в рамках настоящей работы применяется следующая упрощающая постановка задачи. Суммарный ущерб от изъятия СИ в месяце m , исходя из предположения, что все приборы проходят поверку в Центре МТМО, то есть время их отсутствия в эксплуатации определяется параметрами функционирования централизованной СМО. Такой подход позволяет получить верхнюю оценку потенциального ущерба, обусловленного нестационарностью входного потока заявок.

Передача части СИ на поверку во внешние коммерческие организации при этом рассматривается как управляющее воздействие, направленное на снижение загрузки Центра МТМО и, соответственно, уменьшение времени ожидания и отсутствия приборов в эксплуатации. Эффект от данного перераспределения учитывается в модели через изменение коэффициента загрузки системы и соответствующее сокращение времени ожидания, а также через дополнительные затраты на коммерческую поверку.

Таким образом, совокупные потери в месяце m имеют вид

$$B_m(X_m) = U_m^{\Sigma}(\tau_m(X_m)) + Z_m(X_m),$$

где $U_m^{\Sigma}(\tau_m(X_m))$ – суммарный ущерб по всем СИ месяца, агрегированный по всем территориальным органам.

Требуется определить такую величину X_m , при которой суммарные потери минимальны. Оптимизационная задача формулируется так

$$B_m(X_m) \rightarrow \min$$

при обязательном выполнении условия устойчивости системы: $\rho_m(X_m) < 1$.

Полученное решение X_m^* определяет рациональную долю перераспределения заявок в коммерческие организации, обеспечивающую минимизацию совокупных потерь в условиях нестационарного входного потока и фиксированной пропускной способности Центра МТМО.

Обсуждение результатов и управленческие выводы

В качестве эмпирической базы исследования использованы данные о поверке СИ радиационного контроля в Центре МТМО за 2024 г. Согласно итоговой ведомости, за отчётный период было проверено $N_{\text{год}}=3\,388$ СИ. Совокупная трудоёмкость поверки составила $L_{\text{год}}=17\,748,65$ ч, что соответствует среднему времени поверки одного прибора $E[S]=L_{\text{год}}/N_{\text{год}}\approx 5,24$ ч.

Всего каталог содержит 53 типа СИ, существенно различающихся по длительности поверки и стоимости коммерческой поверки.

По данным Центра МТМО, время поверки одного комплекта колеблется в широких пределах:

- минимальное время поверки: 0,85–1,50 ч (например, индивидуальные дозиметры ДКГ-серии);
- типовой диапазон 1,5–7 ч (большинство переносных дозиметров и измерителей мощности дозы);
- повышенная трудоёмкость 10–20 ч;
- максимальное время: до 40 ч (отдельные гамма-спектрометры и приборы с длительным циклом экспозиции).

Такой разброс длительностей обуславливает высокий коэффициент вариации времени обслуживания C_s^2 , что делает модель G/G/C наиболее пригодной для описания функционирования Центра МТМО.

Стоимость поверки во внешних коммерческих организациях по данным прейскурантов варьирует в пределах:

- от 4 900 руб. (большинство индивидуальных дозиметров);
- до 75 000 руб. (гамма-спектрометры и приборы сложных типов);
- типовой диапазон 5–15 тыс. руб. для большинства дозиметров и радиометров.

Это существенно влияет на оптимальную стратегию перераспределения нагрузки, поскольку стоимость коммерческой поверки разных типов СИ отличается в десятки раз.

Для учёта нестационарности входного потока по месяцам введены коэффициенты сезонности k_m , отражающие долю годового объёма, приходящуюся на соответствующий месяц ($\sum_{m=1}^{12} k_m = 1$). На основе анализа работы Центра МТМО получено следующее относительное распределение: пики нагрузки приходятся на май ($\approx 31,5\%$), июнь ($\approx 27,8\%$) и август ($\approx 14,8\%$); вторичные пики – март ($\approx 9\%$) и октябрь ($\approx 7,4\%$); январь, февраль, ноябрь и декабрь практически не формируют нагрузки.

Фонд времени одной поверочной установки в месяц принимается равным $T_m = 192$ ч.

В 2024 г. в работе находилось $C=10$ поверочных установок, что определяет совокупную пропускную способность системы.

Расчётные значения месячного объёма поверок N_m , интенсивности входного потока λ_m и коэффициента загрузки ρ_m приведены в таблице.

Месячные значения N_m , λ_m и ρ_m

Месяц	N_m , шт	λ_m , 1/ч	ρ_m
Январь	0,0	0,000	0,00
Февраль	0,0	0,000	0,00
Март	313,7	1,634	0,86
Апрель	62,7	0,327	0,17
Май	1066,6	5,555	2,91
Июнь	941,1	4,902	2,57
Июль	62,7	0,327	0,17
Август	501,9	2,614	1,37
Сентябрь	188,2	0,980	0,51
Октябрь	251,0	1,307	0,68
Ноябрь	0,0	0,000	0,00
Декабрь	0,0	0,000	0,00

Полученные значения ρ_m демонстрируют резкую сезонность нагрузки на поверочные установки:

1) в мае и июне коэффициент загрузки превышает значение 2,5–3,0, что соответствует состоянию глубокой перегрузки, при которой очередь растёт неограниченно. Такая ситуация делает невозможным выполнение поверки в нормативные сроки;

2) в августе $\rho_m \approx 1,37$, что также превышает область устойчивой работы и приводит к развитию значительных очередей;

3) в марте наблюдается предельная по допустимой эксплуатации нагрузка ($\rho_m \approx 0,86$); при подобных значениях даже небольшое увеличение входного потока приводит к резкому росту времени ожидания.

4) в остальные месяцы года коэффициент загрузки находится в интервале $0,1 \leq \rho_m \leq 0,7$, что соответствует устойчивой работе системы.

Полученные данные подтверждают, что в текущей конфигурации (10 поверочных установок и сезонный поток приборов) система не способна выдерживать нагрузку в весенне-летний период, что приводит к:

- накоплению очередей, растягивающихся на 1–3 мес.;
- увеличению среднего времени отсутствия СИ τ_m ;
- росту ущерба для радиационного мониторинга и АСР.

При фиксированном числе поверочных установок $C=10$ и среднем времени поверки $E[S] \approx 5,24$ ч максимальный месячный объём, обеспечивающий устойчивую работу системы, составляет $N_{кр} = CT_m/E[S] \approx 366$ СИ/мес.

Для месяцев, в которых фактический объём заявок N_m превышает $N_{кр}$, минимальная доля приборов, подлежащих перераспределению в коммерческие лаборатории, определяется выражением $x_m^{\min} = 1 - N_{кр}/N_m$. Расчёты показывают, что для обеспечения условия $\rho_m < 1$ требуется направление в коммерческие организации не менее $x_{\text{май}}^{\min} \approx 0,66$ (около 700 СИ) в мае, $x_{\text{июн}}^{\min} \approx 0,61$ (около 575 СИ) в июне и $x_{\text{авг}}^{\min} \approx 0,27$ (около 136 СИ) в августе. В остальные месяцы годового цикла требуемая доля перераспределения равна нулю, так как $\rho_m \leq 1$ обеспечивается при полной загрузке Центра МТМО.

Таким образом, суммарно за год в коммерческие лаборатории направляется порядка $N_{\text{год}}^{\text{ком}} \approx 1\,410$ СИ, что составляет примерно 41,6 % от годового объёма поверки СИ, тогда ежегодные затраты на поверку оцениваются на уровне 10,4 млн руб. Это минимальные расходы, необходимые для того, чтобы привести объём работ в пиковые месяцы к границе устойчивой работы.

Для оценки эксплуатационного эффекта перераспределения нагрузки дополнительно рассмотрен критерий $\rho_m^{\text{экспл}} \leq 0,8$. При таких значениях загрузки и числе каналов $C=10$ вероятность ожидания обслуживания, оценённая по формуле Эрланга С, составляет порядка $P_{\text{ож}} \approx 0,4$. При этом с учётом высокой вариативности времени обслуживания ($C_s^2 \approx 1,5$)

и неравномерности входного потока ($C_{\alpha,m}^2 \approx 2$) обобщённая аппроксимация (1) даёт оценку среднего времени ожидания в очереди $W_{q,m}$ порядка 1–2 ч. Таким образом, после перераспределения нагрузки среднее время ожидания становится сопоставимым с длительностью самой поверки и существенно меньше, чем в исходном режиме перегрузки.

Заключение

Таким образом, предложенный математический аппарат позволяет формализовать влияние нестационарности входного потока заявок на работу Центра МТМО и объективно оценивать эффективность различных вариантов перераспределения нагрузки между Центром МТМО и внешними коммерческими лабораториями. Полученные зависимости показывают, что фактором, определяющим поведение очереди и время отсутствия СИ в эксплуатации, является коэффициент загрузки ρ_m , который возрастает нелинейно при приближении к единице. Даже относительно небольшие колебания входного потока в периоды пиковых нагрузок приводят к существенному росту среднего времени ожидания для многоканальной системы G/G/C, что, в свою очередь, увеличивает ущерб, связанный с проведением АСР и радиационным мониторингом.

Таким образом, регулирование долей заявок, направляемых на поверку в коммерческие организации, является эффективным инструментом управления рисками ЧС при нестационарных потоках. Увеличение компонентов вектора перераспределения X_m даже на несколько процентов в перегруженных месяцах позволяет вывести систему из зоны перегрузки, резко сократить время ожидания и снизить совокупный потенциальный ущерб. В противоположность этому затраты на передачу приборов во внешние лаборатории растут по мере увеличения X_m практически линейно, что приводит к существованию оптимального решения. Это оптимальное решение соответствует минимуму функции совокупных потерь и определяется балансом между ростом ущерба от увеличения времени отсутствия СИ и расходами на коммерческую поверку.

Сформулированная модель позволяет Центру МТМО:

- количественно оценивать влияние сезонных всплесков нагрузки на метрологическую готовность СИ и потенциальный ущерб подразделений МЧС России;
- определять минимально необходимую долю передачи приборов во внешние лаборатории для обеспечения устойчивости работы (выполнение условия $\rho_m(X_m) < 1$);
- находить оптимальный вектор X_m^* , минимизирующий совокупные потери в условиях конкретного месяца, региона или номенклатуры СИ;
- обосновывать потребность в финансировании коммерческих поверок на основе количественных оценок ущерба, а не только экспертных суждений;
- сравнивать различные варианты организации поверки (изменение графиков, группировка партий, изменение логистических параметров, перераспределение по типам СИ).

Точность оптимизационных решений напрямую зависит от полноты и достоверности исходных данных. Параметры модели могут определяться на основе эмпирических наблюдений, статистики задержек, актов реагирования, результатов радиационного мониторинга и экспертных оценок.

Нестационарность потока является одним из главных факторов образования очередей. Даже при среднегодовой загрузке ниже пороговой сезонные всплески могут приводить к резкой деградации функционирования Центра МТМО в отдельные месяцы.

Небольшая доля передачи приборов в коммерцию способна существенно снизить потенциальный ущерб. Благодаря нелинейному характеру роста времени ожидания, выгоды от стабилизации загрузки часто превосходят прямые расходы на коммерческую поверку.

Оптимизация X_m^* должна выполняться с учётом помесечной динамики нагрузки. Это позволяет учитывать фактическую нестационарность входного потока и различия в структуре СИ по типам и стоимости поверки.

Математический аппарат может служить основой для нормативного планирования и распределения бюджетов. Модель позволяет заранее оценивать потенциальный ущерб и определять рациональные объёмы закупки коммерческих услуг в привязке к конкретным сценариям нагрузки.

Таким образом, предложенный математический аппарат обеспечивает формальную основу для оптимизации процессов поверки СИ радиационного контроля и может служить методической базой для повышения устойчивости и эффективности системы радиационной безопасности МЧС России в условиях нестационарных потоков заявок.

Список источников

1. Технологии аварийно-спасательных работ: учеб. / П.П. Петренко [и др.]. Химки: АГЗ МЧС России, 2022. 275 с.
2. Создание автоматизированной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций с радиационным фактором в Брянской области / О.Н. Апанасюк [и др.] // XXI ВЕК. ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. 2023. № 2. С. 144–155.
3. Рылеева Е.М., Леонова И.В., Гаврилина А.В. Радиационная безопасность в тульской области // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы XVI Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Тула, 2020. С. 86–91.
4. über die Güteprüfung V., der Anlieferungsmilch B. Milch-Güteverordnung vom 9. Juli 1980 (BGBl. I S. 878, 1081), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 17. 2010.
5. К.Г. Земляной, А.Э. Глызина. Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие. Екатеринбург, 2022. 235 с.
6. С.А. Олейникова. Математическое моделирование и системы массового обслуживания. Воронеж: изд-во ВГТУ, 2021. 90 с.
7. Understanding Queuing Theory: Definition, Key Elements, and Real-World Examples. URL: <https://www.investopedia.com/terms/q/queuing-theory.asp> (дата обращения: 12.12.2025).
8. Queueing Theory. URL: <https://www.ebsco.com/research-starters/business-and-management/queueing-theory> (дата обращения: 12.12.2025).
9. Епихин А.В., Резников В.М. Вероятностная оценка эффективности проведения аварийно-спасательных работ // Технологии гражданской безопасности. 2007. № 3. С. 45–47.
10. Основные пути повышения эффективности применения аварийно-спасательных служб при ликвидации чрезвычайных ситуаций: отчёт о НИР / отв. исполн. Попов П.А. Новогорск, 2000.

References

1. Tekhnologii avarijno-spasatel'nyh rabot: ucheb. / P.P. Petrenko [i dr.]. Himki: AGZ MCHS Rossii, 2022. 275 s.
2. Sozdanie avtomatizirovannoj sistemy monitoringa chrezvychajnyh situacij s radiacionnym faktorom v Bryanskoj oblasti / O.N. Apanasyuk [i dr.] // XXI VEK. TEHNOSFERNAYA BEZOPASNOST'. 2023. № 2. S. 144–155.
3. Ryleeva E.M., Leonova I.V., Gavrulina A.V. Radiacionnaya bezopasnost' v tul'skoj oblasti // Social'no-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki: materialy XVI Mezhdunar. konf. po problemam gornoj promyshlennosti, stroitel'stva i energetiki. Tula, 2020. S. 86–91.
4. über die Güteprüfung V., der Anlieferungsmilch B. Milch-Güteverordnung vom 9. Juli 1980 (BGBl. I S. 878, 1081), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 17. 2010.
5. K.G. Zemlyanoj, A.E. Glyzina. Metrologiya, standartizaciya i sertifikaciya: ucheb. posobie. Ekaterinburg, 2022. 235 s.
6. S.A. Olejnikova. Matematicheskoe modelirovanie i sistemy massovogo obsluzhivaniya. Voronezh: izd-vo VGTU, 2021. 90 s.
7. Understanding Queuing Theory: Definition, Key Elements, and Real-World Examples. URL: <https://www.investopedia.com/terms/q/queuing-theory.asp> (data obrashcheniya: 12.12.2025).

8. Queueing Theory. URL: <https://www.ebsco.com/research-starters/business-and-management/queueing-theory> (data obrashcheniya: 12.12.2025).

9. Epihin A.V., Reznikov V.M. Veroyatnostnaya ocenka effektivnosti provedeniya avarijno-spasatel'nyh rabot // Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti. 2007. № 3. S. 45–47.

10. Osnovnye puti povysheniya effektivnosti primeneniya avarijno-spasatel'nyh sluzhb pri likvidacii chrezvychajnyh situacij: otchyot o NIR / otv. ispoln. Popov P.A. Novogorsk, 2000.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 11.02.2026; одобрена после рецензирования: 12.03.2026; принята к публикации: 13.03.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 11.02.2026; approved after review: 12.03.2026; accepted for publication: 13.03.2026

Информация об авторах:

Гарелина Светлана Александровна, профессор кафедры (механики и инженерной графики) Академии гражданской защиты МЧС России им. Д.И. Михайлика (141435, Московская обл., г. Химки, ул. Соколовская, д. 1), кандидат технических наук, доцент, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN-код: 8591-0495

Любкин Роман Николаевич, преподаватель кафедры (эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов) Академии гражданской защиты МЧС России им. Д.И. Михайлика (141435, Московская обл., г. Химки, ул. Соколовская, д. 1), e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN-код: 9786-4862

Information about authors:

Garelina Svetlana A., professor of department of mechanics and engineering graphics of the Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia named after Lieutenant General D.I. Mikhaylik (141435, Moscow region, Khimki, Sokolovskaya st., 1), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 8591-0495

Lyubkin Roman N., lecturer of the department of the exploitation of transport-technological machines and complexes of the Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia named after Lieutenant General D.I. Mikhaylik (141435, Moscow region, Khimki, Sokolovskaya st., 1), e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 9786-4862