

УДК 53.089.6+352/354-1

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОЙ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ОБОСНОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В МЧС РОССИИ

Гарелина Светлана Александровна, Любкин Роман Николаевич
Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена практическому применению комплексной риск-ориентированной методики обоснования рациональных параметров системы организации поверки средств измерений в МЧС России. На примере двадцати территориальных органов и учреждений МЧС России показано последовательное использование модулей методики, включающих приоритизацию объектов, оптимизацию маршрутов подвижных метрологических лабораторий, рациональное распределение средств измерений между стационарными и коммерческими каналами поверки, а также оценку эффективности использования дополнительного бюджета. Методика базируется на учете уровня риска ЧС, пространственного распределения объектов и существующих ресурсных ограничений. Предложенные модели обеспечивают согласование метрологических, логистических и экономических аспектов планирования в рамках единой системы управления. Результаты применения подтверждают возможность повышения эффективности метрологического обеспечения без увеличения затрат и создания инструментов для научно обоснованного распределения поверочных мощностей. Реализация подхода способствует формированию адаптивных схем обслуживания, устойчивых к изменению внешних условий и приоритетов. Представленный подход может служить инструментом для научно обоснованного распределения поверочных ресурсов и адаптации действующих схем поверки к меняющимся условиям функционирования системы МЧС России, а также применяться при планировании метрологического обеспечения в других ведомственных и региональных структурах.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, риск-ориентированный подход, поверка, оптимизация, радиационный мониторинг, подвижная метрологическая лаборатория, бюджетная эффективность

Для цитирования: Гарелина С. А., Любкин Р. Н. Практическая реализация комплексной риск-ориентированной методики обоснования рациональных параметров системы организации поверки средств измерений в МЧС России // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 27–46.

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF A COMPREHENSIVE RISK-BASED METHODOLOGY FOR SUBSTANTIATING THE RATIONAL PARAMETERS OF THE SYSTEM FOR ORGANIZING THE VERIFICATION OF MEASURING INSTRUMENTS IN THE MINISTRY OF EMERGENCY SITUATIONS OF RUSSIA

Svetlana A. Garelina, Roman N. Lyubkin

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

Abstract. The article is devoted to the practical application of a comprehensive risk-based methodology for substantiating the rational parameters of the system for organizing the verification of measuring instruments in the Ministry of Emergency Situations of Russia. Using the example of twenty territorial bodies and institutions of the Ministry of Emergency Situations of Russia, the consistent use of methodology modules is shown, including prioritization of facilities, optimization of routes for mobile metrological laboratories, rational distribution of measuring instruments between stationary and commercial verification channels, as well as an assessment of the effectiveness of using an additional budget. The methodology is based on the level of emergency risk, the spatial distribution of facilities and existing resource constraints. The proposed models ensure the coordination of metrological, logistical and economic aspects of planning within a single management system. The results of the application confirm the possibility of increasing the efficiency of metrological support without increasing costs and creating tools for a scientifically based distribution of testing capacities. The implementation of the approach contributes to the formation of adaptive service schemes that are resistant to changing external conditions and priorities. The presented approach can serve as a tool for the scientifically based allocation of verification resources and the adaptation of existing verification schemes to the changing operating conditions of the EMERCOM of Russia system, as well as be used in the planning of metrological support in other departmental and regional structures.

Keywords: metrological support, risk-based approach, verification, optimization, radiation monitoring, mobile metrological laboratory, budgetary efficiency

For citation: Garelina S. A., Lyubkin R. N. Practical implementation of a comprehensive risk-based methodology for substantiating the rational parameters of the system for organizing the verification of measuring instruments in the Ministry of Emergency Situations of Russia // *Technospheric safety*. 2026. No. 1 (50). Pp. 27–46.

Введение

Система организации поверки средств измерений (далее — СИ) — это управляемая совокупность технических, организационных, ресурсных и нормативных компонентов, обеспечивающих проведение поверочных

мероприятий в подразделениях МЧС России с учетом вероятности и последствий ЧС.

Данная система включает:

1. Технические компоненты.
2. Организационные компоненты.
3. Ресурсные компоненты.
4. Нормативные компоненты.

Под системой организации поверки понимается не просто процесс поверки, а вся совокупность условий, средств и решений, влияющих на своевременность, приоритетность и эффективность поверки СИ, в том числе в условиях риска возникновения ЧС.

Для обеспечения эффективного функционирования данной системы необходимо рациональное распределение ее параметров, влияющих на ее работоспособность, в результате чего и была построена комплексная риск-ориентированная методика (рис. 1).

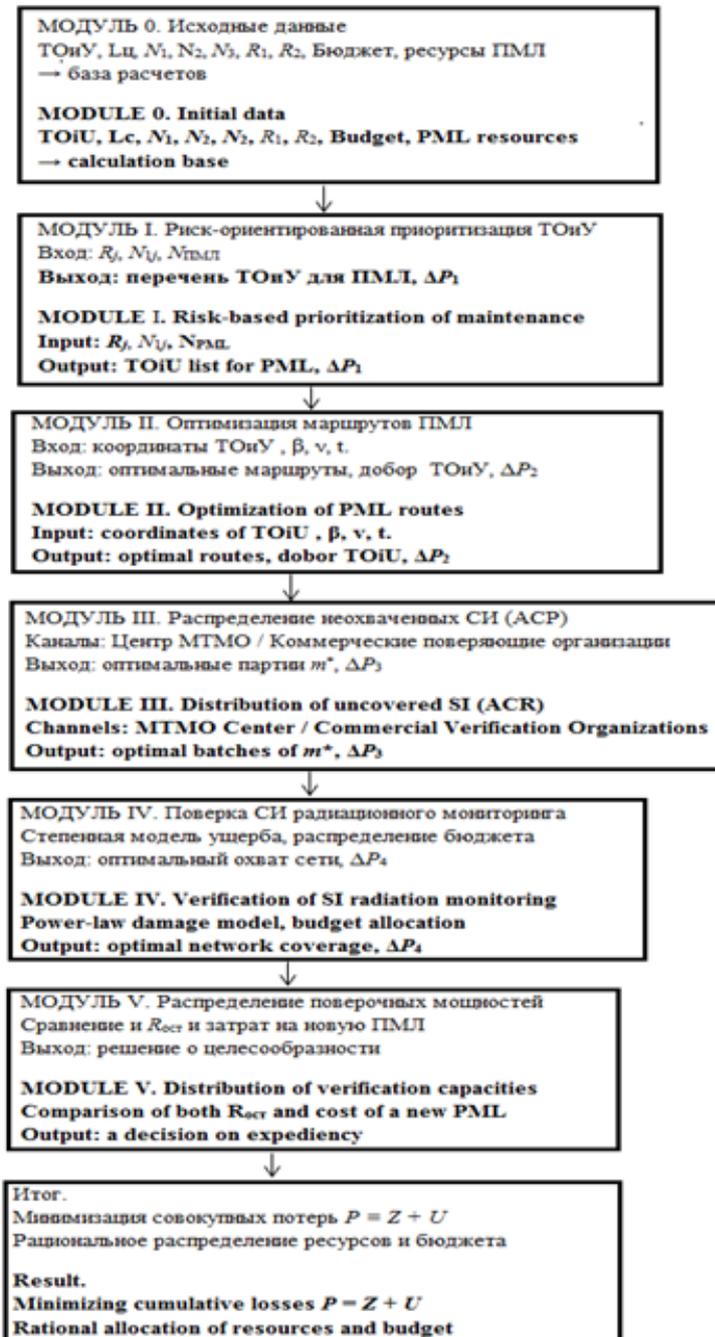


Рис. 1. Комплексная риск-ориентированная методика обоснования рациональных параметров системы организации поверки средств измерений в МЧС России. ТОиУ — территориальные органы и учреждения МЧС России; ПМЛ — подвижная метрологическая лаборатория

Fig. 1. A comprehensive risk-based methodology for substantiating the rational parameters of the system for the organization of verification of measuring instruments in the EMERCOM of Russia. TOIU — territorial bodies and institutions of the Ministry of Emergency Situations of Russia; PML — mobile metrological laboratory

Математический аппарат комплексной риск-ориентированной методики представлен в научной статье [1].

Для демонстрации реализации комплексной риск-ориентированной методики обоснования рациональных параметров системы организации поверки СИ в МЧС России использован укрупненный пример (табл. 1), включающий двадцать территориальных органов и учреждений (далее — ТОиУ), распределенных по удаленности от Центра МТМО и коммерческих структур. В реальных условиях количество ТОиУ превышает 365, однако проведение детализированных расчетов по всей совокупности объектов в рамках данного этапа нецелесообразно. Представленный массив данных служит исключительно для иллюстрации работоспособности предлагаемой методики и анализа ее преимуществ в части оптимизации распределения СИ и минимизации совокупных потерь.

Для каждого ТОиУ заданы пространственные и функциональные характери-

стики. Расстояние до Центра МТМО $L_{ц}$ варьирует от 30 до 400 км, а до ближайшей коммерческой лаборатории $L_{к}$ — от 20 до 100 км, что отражает типичную зависимость: чем ближе ТОиУ к центру, тем меньше расстояние до коммерческих пунктов поверки. Дополнительно для каждого ТОиУ определен угол φ ориентации относительно оси «восток» (от 0 до 360°) в условной полярной системе координат, что позволяет моделировать их пространственное распределение при построении маршрутных схем и оптимизационных карт.

В структуре СИ выделены две группы: N_1 — СИ давления и вакуума (от 100 до 300 шт. на одно ТОиУ); N_2 — СИ радиационного мониторинга (от 20 до 50 шт. на одно ТОиУ). Для каждой группы установлены соответствующие показатели риска ЧС R_1 и R_2 , характеризующие совокупный годовой риск возникновения ЧС, связанный с эксплуатацией данного типа СИ на территории конкретного ТОиУ.

Таблица 1
Исходные данные для реализации комплексной методики риск-ориентированного планирования поверки СИ

Table 1
Initial data for the implementation of a comprehensive methodology for risk-based planning of SI verification

ТОиУ TOiU	$L_{ц}$, км $L_{ц}$, km	φ , град φ , degrees	$L_{к}$, км $L_{к}$, km	N_1 , шт. N_1 , pc	N_2 , шт. N_2 , pc	R_1 , тыс. руб./год R_1 , thousand rubles/ year	R_2 , тыс. руб./год R_2 , thousand rubles/ year
ТОиУ_07 TOiU_07	50	212	20	108	0	3 192	0
ТОиУ_05 TOiU_05	101	177	36	159	0	3 948	0
ТОиУ_12 TOiU_12	117	325	35	191	0	2 472	0
ТОиУ_13 TOiU_13	129	60	46	210	0	768	0
ТОиУ_01 TOiU_01	132	360	41	266	33	3 432	450 126

Окончание таблицы 1

ТОиУ TOiU	$L_{ц}, км$ $L_{ц}, km$	$\varphi, град$ $\varphi,$ degrees	$L_{к}, км$ $L_{к}, km$	$N_1, шт.$ N_1, pc	$N_2, шт.$ N_2, pc	$R_1, тыс. руб./год$ $R_1, thousand rubles/$ year	$R_2, тыс. руб./год$ $R_2, thousand rubles/$ year
ТОиУ_08 TOiU_08	132	17	40	189	40	3 612	140 982
ТОиУ_04 TOiU_04	136	86	42	188	27	1 224	423 133
ТОиУ_09 TOiU_09	151	125	43	152	35	2 844	171 626
ТОиУ_16 TOiU_16	160	306	44	271	0	4 728	0
ТОиУ_17 TOiU_17	179	234	51	107	0	4 512	0
ТОиУ_15 TOiU_15	181	15	53	298	0	3 368	0
ТОиУ_06 TOiU_06	218	96	55	113	0	5 508	0
ТОиУ_10 TOiU_10	244	246	67	229	0	5 148	0
ТОиУ_19 TOiU_19	287	169	72	134	0	4 716	0
ТОиУ_03 TOiU_03	300	53	77	231	0	4 992	0
ТОиУ_18 TOiU_18	338	117	87	274	0	696	0
ТОиУ_11 TOiU_11	360	295	89	183	0	1 080	0
ТОиУ_20 TOiU_20	373	260	95	180	0	2 136	0
ТОиУ_02 TOiU_02	378	223	97	117	0	4 644	0
ТОиУ_14 TOiU_14	389	30	97	289	0	4 200	0

С учетом реальных ограничений по кадровым и техническим ресурсам потенциал подвижной метрологической лаборатории (далее — ПМЛ) $N_{пмл}$ принят на уровне 70 % от общего количества СИ типа N_1 , что соответствует около 2 700 единицам [2]. Такой подход отражает практическую ситуацию, при которой часть оборудования направляется на поверку в коммерческие лабора-

тории, обеспечивая баланс между загрузкой ПМЛ и поддержанием непрерывности контроля.

Этапы практической реализации комплексной методики

Модуль I. Риск-ориентированная приоритизация ТОиУ для обслуживания ПМЛ.

По исходным данным для двадцати ТОиУ выполнены ранжирование по интегральному риску R_j и отбор объектов для обслуживания ПМЛ.

Минимальное и максимальное значения риска: $R_{\min} = 696$ тыс. руб./год (ТОиУ_18), $R_{\max} = 5\,508$ тыс. руб./год (ТОиУ_06). Шаг ранжирования $\Delta R = (R_{\max} - R_{\min}) / 3 =$

$= 1\,604$ тыс. руб./год. Границы рангов: $P_3 < 2\,300$; $P_2 = 2\,300 / 3\,904$; $P_1 > 3\,904$ (тыс. руб./год).

Результаты представлены в табл. 2 и 3. В план включены все ТОиУ высокого риска P_1 , основная часть среднего P_2 и один низкого P_3 , что обеспечило полное использование ресурса ПМЛ.

Таблица 2
Результаты применения Модуля I (отбор ТОиУ для обслуживания ПМЛ)

Table 2

The results of the module I application (selection of TOiU for the maintenance of PML)

ТОиУ TOiU	Ранг Rank	N_1 , шт. N_1 , pc	R_1 , тыс. руб./год R_1 , thousand rubles/year	Входит в план ПМЛ Included in the PML plan
ТОиУ_06 TOiU_06	P_1	113	5 508	Да Yes
ТОиУ_10 TOiU_10	P_1	229	5 148	Да Yes
ТОиУ_03 TOiU_03	P_1	231	4 992	Да Yes
ТОиУ_16 TOiU_16	P_1	271	4 728	Да Yes
ТОиУ_19 TOiU_19	P_1	134	4 716	Да Yes
ТОиУ_02 TOiU_02	P_1	117	4 644	Да Yes
ТОиУ_17 TOiU_17	P_1	107	4 512	Да Yes
ТОиУ_14 TOiU_14	P_1	287	4 200	Да Yes
ТОиУ_05 TOiU_05	P_1	159	3 948	Да Yes
ТОиУ_08 TOiU_08	P_2	189	3 612	Да Yes
ТОиУ_01 TOiU_01	P_2	266	3 432	Да Yes
ТОиУ_07 TOiU_07	P_2	108	3 192	Да Yes
ТОиУ_12 TOiU_12	P_2	191	2 472	Да Yes
ТОиУ_15 TOiU_15	P_3	298	1 368	Да (добор) Yes (get it)
ТОиУ_20 TOiU_20	P_3	180	2 136	Нет No

Окончание таблицы 2

ТОиУ TOiU	Ранг Rank	N_1 , шт. N_1 , pcs	R_1 , тыс. руб./год R_1 , thousand rubles/year	Входит в план ПМЛ Included in the PML plan
ТОиУ_04 TOiU_04	P_3	188	1 224	Нет No
ТОиУ_11 TOiU_11	P_3	183	1 080	Нет No
ТОиУ_13 TOiU_13	P_3	20	768	Нет No
ТОиУ_18 TOiU_18	P_3	274	696	Нет No
ТОиУ_09 TOiU_09	P_3	152	2 844	Нет (заменен) No (replaced)

Таблица 3

Сводные результаты распределения ТОиУ по рангам риска и включения в план обслуживания ПМЛ

Table 3

Summary results of the distribution of TOiU by risk grades and inclusion in the PML maintenance plan

Ранг Rank	Всего ТОиУ Total TOiU	ΣN_1 , шт. ΣN_1 , pcs	Вошло ТОиУ TOiU has entered	ΣN_1 , шт. ΣN_1 , pcs
P_1	9	1 648	9	1 648
P_2	5	906	4	754
P_3	6	1 333	1	298
Итого Total	20	3 887	14	2 700

На рис. 2 представлено условное размещение ТОиУ в полярной системе координат, где расстояние от центра (от 50 до 400 км с шагом в 50 км) соответствует удаленности, а цвет точек отражает ранг риска. Визуализация наглядно показывает распределение приоритетных зон поверки и территориальные ограничения, влияющие на эффективность использования ресурса ПМЛ.

Для количественного сопоставления результатов риск-ориентированного планирования и традиционного подхода выполнено моделирование двух маршрутов ПМЛ.

Вариант А (риск-ориентированный) реализует результаты Модуля I: в план включены четырнадцать ТОиУ (табл. 2), а порядок их обслуживания определяется по принципу минимизации расстояния между последовательными пунктами. Таким образом, маршрут строился методом «ближайшего соседа», при котором каждая следующая точка выбирается как ближайшая по евклидову расстоянию к текущему положению ПМЛ: $L_{ij} = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{0,5}$, где $x = L_{ц} \cos \varphi$, $y = L_{ц} \sin \varphi$. Суммарный пробег маршрута определялся как сумма последовательных переходов от центра к первому объекту и далее между всеми выбранными пунктами.

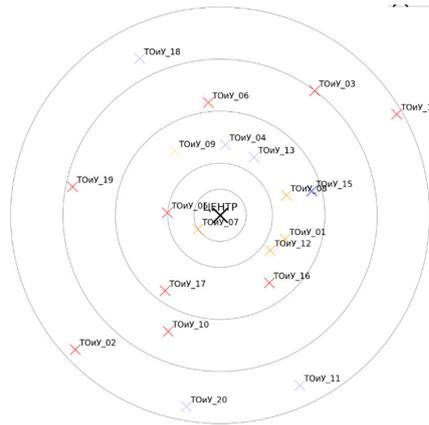


Рис. 2. Условное размещение ТОиУ по рангам риска и результатам отбора ПМЛ: цветовая дифференциация отражает ранги P_1 (красный), P_2 (оранжевый), P_3 (синий); прозрачность указывает на включение объекта в план обслуживания ПМЛ (яркие точки — объекты, вошедшие в план, полупрозрачные — оставшиеся вне его)
 Fig. 2. Conditional placement of TOiU by risk grades and results of PML selection: color differentiation reflects ranks P_1 (red), P_2 (orange), P_3 (blue); transparency indicates the inclusion of the object in the PML maintenance plan (bright dots — objects included in the plan, translucent — remaining outside it)

Вариант В (территориальный, географический) формировался по тому же принципу минимизации расстояния, но без учета приоритета по риску. В маршруте участвовали все двадцать ТОиУ (табл. 1), из которых последовательно выбирались ближайшие к текущему положению ПМЛ, пока суммарное количество поверяемых СИ не достигало 2 700. При достижении лимита, если добавление очередного ТОиУ приводило к его

превышению, данный объект пропускался, и в маршрут включался следующий по близости (метод «ближайшего соседа»).

Для обоих сценариев вычислялись: суммарная длина маршрута L_2 , км; остаточные (непокрытые) потери ΔU_1 (часть потенциального ущерба от ЧС, которая не была предотвращена данным вариантом организации проверки). Результаты расчетов представлены в табл. 4–6.

Таблица 4
Маршрут ПМЛ (вариант А — риск-ориентированный, метод ближайшего соседа)

Table 4
 PML route (option A — risk-based, nearest neighbor method)

№	ТОиУ TOiU	Расстояние от предыдущего, км Distance from the previous one, km	N_1 , шт. N_1 , pc
1	ТОиУ_07 TOiU_07	50,00	108
2	ТОиУ_05 TOiU_05	66,54	159
3	ТОиУ_17 TOiU_17	150,16	107
4	ТОиУ_10 TOiU_10	78,32	229
5	ТОиУ_02 TOiU_02	180,61	117
6	ТОиУ_19 TOiU_19	312,60	134

Окончание таблицы 4

№	ТОиУ TOiU	Расстояние от предыдущего, км Distance from the previous one, km	N_1 , шт. N_1 , pc
7	ТОиУ_06 TOiU_06	305,46	113
8	ТОиУ_03 TOiU_03	204,60	231
9	ТОиУ_14 TOiU_14	162,71	287
10	ТОиУ_15 TOiU_15	291,23	298
11	ТОиУ_08 TOiU_08	49,3	189
12	ТОиУ_01 TOiU_01	87,77	266
13	ТОиУ_12 TOiU_12	35,74	191
14	ТОиУ_16 TOiU_16	62,36	271

Таблица 5
Маршрут ПМЛ (вариант В — территориальный, метод ближайшего соседа)

Table 5
PML route (option B — territorial, nearest neighbor method)

№	ТОиУ TOiU	Расстояние от предыдущего, км Distance from the previous one, km	N_1 , шт. N_1 , pc
1	ТОиУ_07 TOiU_07	50,00	108
2	ТОиУ_05 TOiU_05	66,54	159
3	ТОиУ_09 TOiU_09	119,26	152
4	ТОиУ_04 TOiU_04	96,84	188
5	ТОиУ_13 TOiU_13	60,00	210
6	ТОиУ_08 TOiU_08	95,70	189
7	ТОиУ_15 TOiU_15	49,30	298
8	ТОиУ_01 TOiU_01	105,08	266
9	ТОиУ_12 TOiU_12	35,74	191
10	ТОиУ_16 TOiU_16	62,36	271

Окончание таблицы 5

№	ТОиУ TOiU	Расстояние от предыдущего, км Distance from the previous one, km	N_1 , шт. N_1 , pc
11	ТОиУ_17 TOiU_17	199,85	107
12	ТОиУ_10 TOiU_10	78,32	229
13	ТОиУ_20 TOiU_20	148,49	180
14	ТОиУ_02 TOiU_02	238,34	117

Таблица 6

Сравнение маршрутных стратегий обслуживания ПМЛ

Table 6

Comparison of PML service route strategies

Показатель Indicator	Вариант А Option A	Вариант В Option B	Разница (В-А) Difference (B-A)
L_{Σ} , км L_{Σ} , km	1 961	1 406	-555
N_1	2 700	2 665	-35
ΔU_i , тыс. руб./год ΔU_i , thousand rubles/ year	8 748	21 192	+12 444
Снижение ΔU_i , % Decline ΔU_i , %	—	≈ 59 %	—

На рис. 3 показано сравнение пространственной конфигурации маршрутов ПМЛ для двух сценариев планирования. Риск-ориентированный маршрут (вариант А) охватывает более удаленные и пространственно разобщенные ТОиУ, что приводит к увеличению общей длины пути ($\approx 1\,960$ км против $\approx 1\,400$ км при варианте В). Однако именно в этих зонах сосредоточены объекты с наибольшими значениями риска R_j (ранги P_1, P_2), поэтому их включение в план обеспечивает снижение непокрытого совокупного ущерба более, чем на 59 % при сохранении того же поверочного охвата.

Риск-ориентированная стратегия формирует оптимальное соотношение между транспортными затратами и выигрышем

по предотвращенным потерям ΔP_i , а также служит основой для последующего моделирования маршрутов и распределения ресурсов в рамках модулей II и III.

Применение критерия риска при отборе ТОиУ позволило повысить эффективность использования ресурса ПМЛ: при одинаковом объеме поверяемых СИ N_1 совокупный ущерб снизился почти в 2,5 раза по сравнению с территориальным распределением. Увеличение протяженности маршрута объясняется неравномерным пространственным расположением наиболее рискованных объектов, однако дополнительные транспортные затраты полностью компенсируются снижением потенциального ущерба.

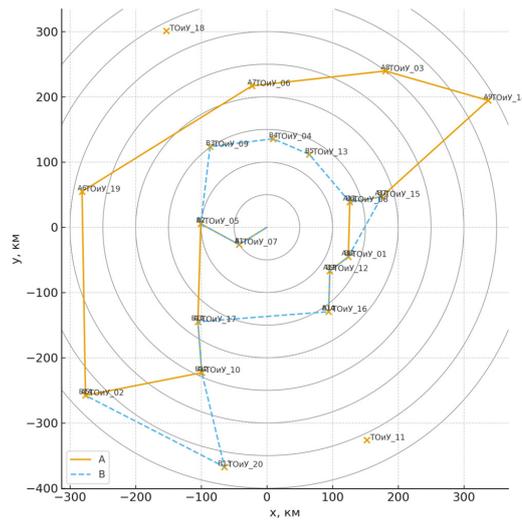


Рис. 3. Схематическое наложение маршрутных стратегий ПМЛ на карту размещения ТОиУ: сплошная линия — вариант А (риск-ориентированный), пунктирная — вариант В (территориальный)

Fig. 3. Schematic superimposition of PML route strategies on the map of the location of the MRT: solid line — option A (risk-oriented), dotted line — option B (territorial)

Модуль II. Оптимизация маршрутов ПМЛ.

Оптимизация маршрутов ПМЛ выполнялась при ограничении длительности каждой командировки $\beta = 7$ сут. при 8-часовом рабочем дне. В модели учитывались затраты времени на переезды и поверку, а также возврат в Центр после каждой командировки.

Нормативы и исходные параметры для расчетов: время на поверку одного СИ: $t = 0,04$ ч; скорость передвижения ПМЛ: $u = 60$ км/ч.

Для маршрута А, сформированного по результатам модуля I (четырнадцать ТОиУ), выполнена временная сегментация. В результате выделено четыре командировки с суммарным пробегом $\approx 2\,886$ км и общим временем ≈ 156 ч (19,5 сут.):

K1: ТОиУ_07 → 05 → 17 → 10 → 02 → 19 → Центр МТМО. $\Sigma N_1 = 854$; пробег $\approx 1\,125,2$ км; переезды 18,75 ч; поверка 34,16 ч. Итого 52,91 ч = 6,61 сут.

K2: ТОиУ_06 → 03 → 14 → Центр МТМО. $\Sigma N_1 = 631$; пробег $\approx 974,3$ км; переезды 16,24 ч; поверка 25,24 ч. Итого 41,48 ч = 5,18 сут.

K3: ТОиУ_15 → 08 → 01 → 12 → Центр МТМО. $\Sigma N_1 = 944$; пробег $\approx 466,8$ км; переезды 7,78 ч; поверка 37,76 ч. Итого 45,54 ч = 5,69 сут.

K4: ТОиУ_16 → Центр МТМО. $\Sigma N_1 = 271$; пробег $\approx 320,0$ км; переезды 5,335 ч; поверка 10,841 ч. Итого 16,17 ч = 2,02 сут.

Для повышения эффективности маршрутизации ПМЛ при сохранении тех же ограничений по времени командировки проведена оптимизация порядка посещения ТОиУ. Подбор параметров осуществлялся экспериментально, обеспечивая устойчивое снижение целевой функции при сохранении ограничений по β . Алгоритм показал сходимость к квазистационарному решению за 6–7 тыс. итераций.

Основные настройки использованной модели

Температура 0,5 выбрана эмпирически — задает требуемый уровень стохастичности на старте, позволяя алгоритму избежать локальных минимумов за счет допуска части невыгодных перестановок (до 10–15 %).

Коэффициент охлаждения 0,999 5 — задает плавное экспоненциальное снижение

температуры (примерно — 40 % за 2 000 итераций), являясь компромиссом между скоростью и точностью сходимости.

Количество итераций — 8 000 для четырнадцати ТОиУ, что обеспечивает достижение стационарного решения.

В результате оптимизации получен улучшенный маршрут, обеспечивающий ком-

пактное географическое распределение ТОиУ и снижение суммарного пробега при том же поверочном охвате (табл. 7). Итоговая последовательность точек имеет вид: ТОиУ_05 → ТОиУ_19 → ТОиУ_02 → ТОиУ_10 → ТОиУ_17 → ТОиУ_07 → ТОиУ_16 → ТОиУ_12 → ТОиУ_01 → ТОиУ_08 → ТОиУ_15 → ТОиУ_14 → ТОиУ_03 → ТОиУ_06.

Таблица 7
Результаты оптимизации маршрута ПМЛ методом имитации отжига

Table 7

Results of optimization of the PML route by simulated annealing

Командировка Business trip	Последовательность ТОиУ The TOiU sequence	ΣN_1	Пробег, км Mileage, km	Перезезды, ч Crossings, hours	Поверка, ч Verification, hours	Итого, ч Total, hours	Итого, дни Total days
1	05 → 19 → 02 → 10 → 17 → 07 → Центр МТМО	854	1 044,0	17,4	34,16	51,56	6,44
2	16 → 12 → 01 → 08 → Центр МТМО	917	473,9	7,90	36,68	44,58	5,57
3	15 → 14 → 03 → 06 → Центр МТМО	929	985,5	16,43	37,16	53,59	6,70

На рис. 4 представлено сравнение пространственной конфигурации маршрутов ПМЛ для двух алгоритмов. Хорошо видно, что при имитации отжига маршруты становятся более компактными, с меньшими пересечениями и рациональными петлями относительно центра.

Таким образом, применение алгоритма имитации отжига [3, 4] позволило: сократить число командировок (с четырех до трех); уменьшить пробег ПМЛ на $\approx 13\%$; снизить совокупное время маршрутизации на $\approx 4\%$; сохранить полный охват без превышения ограничений β .

Таким образом, по сравнению с маршрутом, построенным по методу ближайшего соседа (жадный метод) [5, 6], появилась резервная командировка продолжительностью семь суток, которую можно использовать для

расширения охвата ТОиУ, ранее не вошедших в план ПМЛ.

Для рационального использования высвободившегося ресурса выполнен подбор дополнительных объектов из списка невошедших ТОиУ (табл. 2) по принципу убывания риска R_1 .

Оптимизация добора показала, что включение всех шести оставшихся ТОиУ в одну командировку невозможно — совокупное время (≈ 75 ч) превышает норматив β . При этом моделирование с учетом минимизации пробега выявило оптимальную конфигурацию: в состав дополнительной командировки вошли ТОиУ_04, ТОиУ_09, ТОиУ_20 и ТОиУ_11, обеспечивающие наибольший дополнительный выигрыш по предотвращенным потерям 7 284 тыс. руб./год при соблюдении временных ограничений.

Маршрут добора сформировался в последовательности: ТООУ_04 → ТООУ_09 → ТООУ_20 → ТООУ_11 → Центр МТМО, что соответствует пробегу ≈ 1 305 км и общему времени маршрутизации ≈ 49,9 ч (6,2 сут.). Тем самым высвобожденная за счет оптимизации командировка используется полностью, не превышая лимит β, и позволяет дополнительно поверить около 700 СИ и предотвратить ущерб порядка 7,3 млн руб./год.

Таким образом, внедрение Модуля II не только обеспечивает сокращение числа командировок и пробега по сравнению с исходным маршрутом, но и создает воз-

можность расширения охвата ТООУ за счет добора объектов в рамках неизменных ресурсных ограничений, что существенно повышает общую эффективность планирования работы ПМЛ.

Совместное применение модулей I и II позволило снизить непокрытый ущерб с 21,2 до 1,46 млн руб./год и увеличить предотвращенные потери почти в 1,6 раз по сравнению с базовым сценарием. Совокупный эффект оптимизации маршрутов и рационального добора ТООУ составил ≈ 19,7 млн руб./год при сохранении нормативных ограничений по времени и ресурсам ПМЛ.

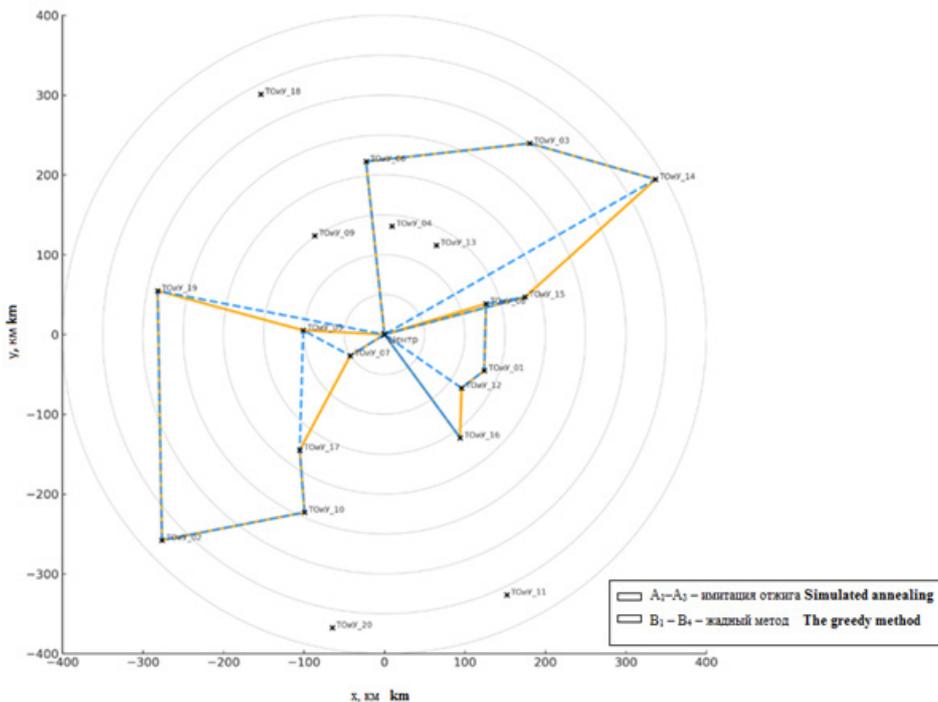


Рис. 4. Сравнение маршрутов ПМЛ при β = 7 сут.: жадный (B1–B4, пунктирные линии) и оптимизированный методом имитации отжига (A1–A3, сплошные линии, с возвратом в Центр МТМО)

Fig. 4. Comparison of PML routes at β = 7 days: greedy (B1–B4, dotted lines) and optimized by simulated annealing (A1–A3, solid lines, with return to the MTMO Center)

Модуль III. Распределение неохваченных ПМЛ СИ между каналами поверки.

Вне плана обслуживания ПМЛ остались два объекта — ТООУ_13 и ТООУ_18, их суммарный риск составляет ≈ 1 464 тыс. руб./год. Для этих ТООУ выполнена оптимизация распределения СИ между стационар-

ными каналами поверки при бюджетных ограничениях.

Для рассматриваемого этапа принято ΔZ_{III} = 0, что исключает использование коммерческих каналов; расчеты выполнены только для Центра с учетом собственных транспортных и временных ресурсов.

Использованы параметры: $\alpha = 0,046 \text{ ч}^{-1}$, $T = 0,33 \text{ ч}$, $Y = 50\,000 \text{ руб.}$, $B = 10,2 \text{ руб./км}$ [5]. Для учета индивидуальных характеристик риска определены частоты ЧС ω_j , пропорциональные годовому риску каждого

объекта: $\omega_j = R_j/Y/12$. Результаты расчета составили: $\omega(\text{ТОиУ}_{13}) = 1,28 \text{ мес.}^{-1}$; $\omega(\text{ТОиУ}_{18}) = 1,16 \text{ мес.}^{-1}$.

Результаты расчета рационального количества партий m^* представлены в табл. 8.

Таблица 8
Результаты расчета рационального количества партий m^*

Table 8
Results of calculating the rational number of batches m^*

ТОиУ TOiU	Z_2 , руб. Z_2 , rub.	m^* ($M = 0,5 \text{ мес.}$) m^* ($M = 0,5 \text{ month}$)	m^* ($M = 1,0 \text{ мес.}$) m^* ($M = 1,0 \text{ month}$)	m^* ($M = 2,0 \text{ мес.}$) m^* ($M = 2,0 \text{ month}$)
ТОиУ ₁₃ TOiU ₁₃	2 632	3	5	7
ТОиУ ₁₈ TOiU ₁₈	6 895	3	4	6

Полученные значения m^* демонстрируют закономерную зависимость: для ближайшего и более рискованного ТОиУ₁₃ рационально большее дробление партий (3–7 партии в зависимости от M), а для удаленного ТОиУ₁₈ при более высоких логистических затратах целесообразно ограничиться 3–6 партиями.

Для сопоставления с базовым сценарием ($\Delta Z_{III} = 0$) рассмотрен альтернативный вариант, при котором весь остаток СИ (ТОиУ₁₃ и ТОиУ₁₈) направляется в аккредитованные коммерческие лаборатории (табл. 9). Принятые допущения для коммерческого канала: $M = 0,25 \text{ мес.}$; число партий фиксировано $m = 2$; стоимость поверки: $400 \text{ руб./шт.} \times N_1$.

Таблица 9
Сравнение совокупных потерь при поверке неохваченных ПМЛ СИ в Центре МТМО и в коммерческой лаборатории

Table 9
Comparison of cumulative losses during verification of uncovered CML SI at the MTMO Center and in a commercial laboratory

ТОиУ TOiU	Канал поверки Verification channel	M , мес. M , month	m	Z_1 , руб. Z_1 , rub.	Z_2 , руб. Z_2 , rub.	Поверка, руб. Verification, rub.	$P = Z_1 + Z_2 m$, руб. $P = Z_1 + Z_2 m$, rub.
ТОиУ ₁₃ TOiU ₁₃	Центр МТМО MTMO Center	1,0	5	51 229,27	13 158,0	—	64 387,27
	Коммерция Commerce	0,25	2	50 488,13	1 876,8	84 000	136 364,93
ТОиУ ₁₈ TOiU ₁₈	Центр МТМО MTMO Center	1,0	4	51 187,81	27 580,8	—	78 768,61
	Коммерция Commerce	0,25	5	50 442,16	3 549,6	109 600	163 591,76

При реалистичных параметрах стоимости и расстояний совокупные потери P в Центре МТМО остаются значительно ниже, чем в коммерческом канале. Сокращение времени поверки в коммерции уменьшает ущерб Z_1 , но рост денежных затрат превышает этот эффект. Следовательно, при ограниченном бюджете поверка остатка СИ в Центре МТМО остается оптимальной стратегией.

Для оценки эффекта от внедрения рационального дробления m^* рассмотрен

сценарий со средней частотой срабатываний $\omega = 3,2 \text{ мес.}^{-1}$. Результаты (по сравнению с базовым $m = 2$) показаны в табл. 10.

Оптимизация числа партий m^* обеспечивает снижение ожидаемого ущерба на 28–31 % и совокупных потерь на 16–24 %. Таким образом, рациональное дробление поверочных партий является эффективным инструментом снижения интегрального риска и повышения результативности поверочного планирования в условиях ограниченных ресурсов.

Таблица 10

Снижение совокупных потерь при рациональном дроблении партий поверки

Table 10

Reduction of total losses during rational splitting of verification batches

ТОиУ TOiU	$m = 2 \rightarrow m^*$	$Z_1(m = 2)$, руб. $Z_1(m = 2)$, rub.	$Z_1(m^*)$, руб. $Z_1(m^*)$, rub.	ΔZ_1 , %	$P(m = 2)$, руб. $P(m = 2)$, rub.	$P(m^*)$, руб. $P(m^*)$, rub.	ΔP , %
ТОиУ_13 TOiU_13	2 → 5	132 098	91 764	-30,5 %	137 361	104 922	-23,6 %
ТОиУ_18 TOiU_18	2 → 4	132 098	95 555	-27,7 %	145 888	123 136	-15,6 %

Модуль IV. Оптимизация поверки СИ радиационного мониторинга.

На данном этапе выполняется распределение общего бюджета на поверку СИ радиационного мониторинга между каналами поверки — Центр МТМО и ком-

мерческими лабораториями. Принят совокупный лимит $\Delta Z_{IV} = 1\,000\,000$ руб., распределяемый пропорционально годовому риску R_2 (табл. 11) каждого ТОиУ. Стоимость поверки в коммерческих лабораториях — 14 000 руб./СИ.

Таблица 11

Распределение бюджета и объема поверки между каналами

Table 11

Distribution of budget and volume of verification between channels

ТОиУ TOiU	R_2 , тыс. руб./год R_2 , thousand rubles/year	Доля риска The share of risk	Доля бюджета, руб. Budget share, rub.	Кол-во СИ, поверенных в коммерческих лабораториях Number of SI attorneys in commercial laboratories	Партии СИ Batches of measuring instruments	Стоимость поверки, руб. Cost of verification, rub.	Затраты на транспорт, руб. Transportation costs, rub.	Итого, руб. Total, rub.
ТОиУ_01 TOiU_01	450 126	38 %	379 575	25	5 × 5	350 000	4 182	354 182

Окончание таблицы 11

ТОиУ TOiU	R_2 тыс. руб./год R_2 , thousand rubles/ year	Доля риска The share of risk	Доля бюд- жета, руб. Budget share, rub.	Кол-во СИ, поверенных в коммерческих лабораториях Number of SI attorneys in commercial laboratories	Партии СИ Batches of measuring instruments	Стоимость поверки, руб. Cost of verification, rub.	Затраты на транспорт, руб. Transportation costs, rub.	Итого, руб. Total, rub.
ТОиУ_04 TOiU_04	423 133	36 %	356 813	25	5 × 5	350 000	4 284	354 284
ТОиУ_08 TOiU_08	140 982	12 %	118 885	8	2 × 4	112 000	1 632	113 632
ТОиУ_09 TOiU_09	171 626	14 %	114 726	10	2 × 5	140 000	1 754	141 754
Итого Total	—	—	1 000 000	68	—	952 000	11 852	963 852

Бюджет использован на 96,4 %, при этом поверено 68 СИ радиационного мониторинга в коммерции.

Остаток СИ направляется в Центр МТМО, где оптимальные значения m^* опреде-

ляются по степенной модели (при $\gamma = 1,8$; $B_{\max} = R_2$) с ограничением по размеру партии (≈ 5 СИ). Расчет выполнен для двух режимов длительности поверочного цикла — $M = 1$ и $M = 2$ мес. (табл. 12).

Таблица 12
Оптимальные партии в Центр МТМО (после распределения бюджета)

Table 12
Optimal shipments to the MTMO Center (after budget allocation)

ТОиУ TOiU	В Центр МТМО To the MTMO Center	m^* ($M = 1, 2$ мес.) m^* ($M = 1, 2$ month)	План партии The party plan	Затраты на транспорт, руб. Transportation costs, rub.	Z_1 , руб. ($M = 1$ мес.) Z_1 , rub. ($M = 1$ month)	Z_2 , руб. ($M = 2$ мес.) Z_2 , rub. ($M = 2$ month)
ТОиУ_01 TOiU_01	8	1	1 × 8	2 692,8	37 540 000	75 080 000
ТОиУ_04 TOiU_04	2	1	1 × 2	2 774,4	35 267 000	70 534 000
ТОиУ_08 TOiU_08	32	6	6 × 5–6	16 156,8	2 804 000	5 608 000
ТОиУ_09 TOiU_09	25	5	5 × 5	15 402,0	3 949 000	7 898 000
Итого Total	67	—	—	36 026,0	79 560 000	159 120 000

Таким образом, из 135 СИ радиационного мониторинга 68 единиц (≈ 50 %) поверяются в аккредитованных коммерческих лабораториях при $M = 0,25$ мес.,

а оставшиеся 67 — в Центре МТМО (при $M = 1–2$ мес.).

Для количественной оценки эффекта от внедрения риск-ориентированной схемы

распределения СИ радиационного мониторинга между каналами поверки (Центр МТМО и аккредитованные коммерческие лаборатории) проведено сравнение двух сценариев (табл. 13):

- 1) базовый сценарий — все СИ поверяются только в Центре МТМО;
- 2) оптимизированный сценарий — часть СИ направляется в аккредитованные коммерческие лаборатории согласно рассчитанному бюджетному распределению (табл. 11, 12).

Таким образом, предотвращенный ущерб от использования коммерческих каналов по-

верки составляет $\approx 26,3$ млн руб./год (если альтернативой был бы Центр МТМО с $M = 1$ мес.); $\approx 61,4$ млн руб./год (если альтернативой был бы Центр МТМО с $M = 2$ мес.). Эти величины уже сопоставимы по масштабу с принятыми рисками R_2 и отражают реальную экономию от ускоренной поверки в коммерческих лабораториях. При бюджете 1 000 000 руб. и цене поверки 14 000 руб./СИ оптимально поверить 68 СИ в коммерции.

Таким образом, рациональное распределение СИ между каналами поверки является действенным механизмом снижения интегрального риска при ограниченном бюджете.

Таблица 13

Проигрыш в потенциальном ущербе при отсутствии коммерческих каналов поверки

Table 13

Loss in potential damage in the absence of commercial verification channels

ТОиУ TOiU	m	Z_1 , руб. ($M = 1$ мес.) Z_1 , rub. ($M = 1$ month)	Z_1 , руб. ($M = 2$ мес.) Z_1 , rub. ($M = 2$ month)
ТОиУ_01 TOiU_01	5	7 762 000	17 204 000
ТОиУ_04 TOiU_04	5	7 298 000	16 228 000
ТОиУ_08 TOiU_08	2	5 061 000	15 217 000
ТОиУ_09 TOiU_09	2	6 158 000	12 707 000
Итог Total	—	26 279 000	61 356 000

Модуль V. Расширение поверочных мощностей.

На заключительном этапе оценивалась экономическая целесообразность расширения поверочных мощностей за счет приобретения второй ПМЛ.

Даже при максимально благоприятном сценарии, когда предполагается, что дополнительная ПМЛ полностью устраняет ущерб для непокрытых объектов (ТОиУ_13 и ТОиУ_18), годовой предотвращенный эф-

фект составляет лишь 0,10–0,11 млн руб./год. Эта величина на два порядка меньше ежегодных затрат на владение одной ПМЛ, оцениваемых в 12 млн руб./год.

При корректном учете лишь дополнительного ущерба, возникающего из-за изъятия СИ на поверку, предотвращенный эффект снижается до $\approx 2,4$ тыс. руб./год, что делает инвестицию экономически неоправданной.

Таким образом, условие целесообразности не выполняется: при заданных

параметрах системы расширение парка ПМЛ до двух единиц нецелесообразно. Оптимальным остается вариант эксплуатации одной лаборатории с реализацией риск-ориентированных модулей I–III, обеспечивающих минимизацию совокупных потерь при сохранении установленных ограничений по времени и ресурсам.

Итоговое распределение дополнительного бюджета между модулями I–V

Для оценки приоритетов дальнейшего развития системы выполнено распределение дополнительного бюджета ΔB между модулями I–V на основе критерия максимальной предотвращенной потери $\Delta P_i / \Delta Z_i$.

Приоритет финансирования принадлежит Модулю IV, поскольку предотвращенный ущерб при переводе СИ радиационного мониторинга в коммерческие лаборатории имеет наибольшее соотношение «эффект — затраты». По расчетам, перевод 68 СИ обеспечивает снижение совокупного ущерба на $\approx 26,3$ млн руб./год; для остатка из 67 СИ эффект составит $\approx 25,9$ млн руб./год при затратах 0,94 млн руб., что соответствует исключительно высокой эффективности.

Модуль II обеспечивает устойчивое снижение совокупных потерь по всей сети за счет масштабирования алгоритмов оптимизации маршрутов ПМЛ при относительно низкой стоимости внедрения.

Модули I и III требуют минимальных вложений и направлены на поддержание и развитие риск-ориентированной аналитики и рациональных поверочных календарей m^* , обеспечивая дополнительное снижение остаточного риска в Центр МТМО.

Модуль V финансируется только в части НИОКР без приобретения новой ПМЛ, поскольку расчеты показали экономическую

нецелесообразность ее покупки при текущем профиле загрузки.

Такое распределение средств обеспечивает максимальное снижение интегрального риска при фиксированном дополнительном бюджете и соответствует результатам модели потерь, полученным в модулях III–IV.

Заключение

Разработанная и реализованная комплексная риск-ориентированная методика обеспечивает научно обоснованное принятие решений при планировании поверки средств измерений в системе МЧС России. Ее модульная структура позволяет учитывать пространственные, метрологические и экономические ограничения, а также уровень риска ЧС на каждом объекте.

Модуль I продемонстрировал, что применение критерия риска при отборе территориальных органов и учреждений для обслуживания подвижной метрологической лабораторией позволяет снизить совокупный ущерб почти в 2,5 раза по сравнению с территориальным принципом планирования без увеличения ресурсных затрат.

Модуль II показал, что оптимизация маршрутов подвижной метрологической лаборатории методом имитации отжига позволяет сократить количество командировок с четырех до трех, уменьшить суммарный пробег примерно на 13 %, при этом сохранить полный объем поверки. Совместное применение первого и второго модулей обеспечило снижение непокрытого ущерба с 21,2 до 1,46 млн руб. в год и совокупный выигрыш порядка 19,7 млн руб. в год.

Модуль III подтвердил эффективность рационального дробления партий поверки

в Центр МТМО: при ограниченных ресурсах снижение ожидаемого ущерба достигает 28–31 %, а совокупных потерь — до 24 %. Такой подход обеспечивает гибкое управление ресурсами и адаптацию к индивидуальным характеристикам риска каждого территориального объекта.

Модуль IV доказал высокую экономическую результативность распределения средств измерений радиационного мониторинга между Центром МТМО и аккредитованными коммерческими лабораториями. При бюджете 1 млн рублей предотвращенный ущерб составляет 26–61 млн руб. в год, что делает этот модуль наиболее эффективным по показателю соотношения «эффект — затраты».

Модуль V показал, что расширение парка подвижных метрологических лабораторий нецелесообразно при существующем объеме работ: предотвращенный ущерб на два порядка меньше годовых эксплуатационных расходов. Оптимальным остае-

тся использование одной лаборатории с применением риск-ориентированных решений, разработанных в предыдущих модулях.

Итоговое распределение дополнительного бюджета между модулями I–V по критерию максимальной предотвращенной потери подтвердило приоритет четвертого модуля (около 25,9 млн руб. предотвращенного ущерба в год при затратах 0,94 млн руб.) и высокую эффективность модулей I–III при умеренных вложениях.

Практическая реализация методики обеспечивает согласование метрологических, логистических и экономических факторов в единой системе управления поверочными ресурсами МЧС России. Применение риск-ориентированных принципов позволяет достигать значительного снижения совокупного риска без увеличения бюджета и создает основу для дальнейшего развития адаптивных моделей организации метрологического обеспечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гарелина С. А., Любкин Р. Н. Формирование логики риск-ориентированного планирования поверки средств измерений в МЧС России // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 183–193.
2. Метрологическая лаборатория на шасси FORD TRANS // АВТОМАСТЕР. Производство автомобилей малых серий. URL: <https://clck.ru/3RshAu> (дата обращения: 13.01.2026).
3. Метод отжига // Алгоритмика. URL: <https://clck.ru/3RshGi> (дата обращения: 24.03.2025).
4. Delahaye D., Chaimatanan S., Mongeau M. Simulated annealing: From basics to applications // Handbook of Metaheuristics. 3rd ed. Cham, 2019. Pp. 1–35.
5. Совершенный алгоритм. Жадные алгоритмы и динамическое программирование. СПб., 2020. 256 с.
6. A Comparison of Greedy Algorithm and Dynamic Programming Algorithm // Web of Conferences SHS. URL: <https://clck.ru/3RsgWr> (дата обращения: 15.11.2025).

REFERENCES

1. Garelina S. A., Lyubkin R. N. Formation of the logic of risk-oriented planning of metrological testing in the Russian Ministry of Emergency Situations // *Technospheric safety*. 2025. № 4 (49). Pp. 183–193.
2. Metrological laboratory on FORD TRANSIT chassis // *AUTO REPAIR SHOP*. Production of small-series cars. URL: <https://clck.ru/3RshAu> (accessed 13.01.2026).
3. Annealing method // *Algorithmics*. URL: <https://clck.ru/3RshGi> (accessed 24.03.2025).
4. Delahaye D., Chaimatanan S., Mongeau M. Simulated annealing: From basics to applications // *Handbook of Metaheuristics*. 3rd ed. Cham, 2019. Pp. 1–35.
5. Perfect algorithm. Greedy algorithms and dynamic programming. St. Petersburg, 2020. 256 p.
6. A Comparison of Greedy Algorithm and Dynamic Programming Algorithm // *Web of Conferences SHS*. URL: <https://clck.ru/3RsgWr> (accessed 15.11.2025).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарелина Светлана Александровна, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 8591-0495; AuthorID: 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Любкин Роман Николаевич, преподаватель кафедры эксплуатации транспортно-технологических машин и комплексов Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Российская Федерация, г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А); SPIN-код: 9786-4862; AuthorID: 1119833; e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Svetlana A. Garelina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 8591-0495; AuthorID 163638; e-mail: s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru

Roman N. Lyubkin, Lecturer of the Department of the Exploitation of Transport-technological Machines and Complexes Civil Defence Academy EMERCOM of Russia (1A Sokolovskaya St., Khimki, md. Novogorsk, 141435, Russian Federation); SPIN-code: 9786-4862; AuthorID: 1119833; e-mail: r.lyubkin@agz.50.mchs.gov.ru