

УДК 504.06:330.13

## АПРОБАЦИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ СТРАТЕГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И МОНИТОРИНГА НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Гарелина Светлана Александровна

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Российская Федерация

**Аннотация.** Статья посвящена апробации многопараметрической модели, предназначенной для оптимизации стратегий переработки отходов и организации мониторинга на промышленных объектах. Модель объединяет показатели остаточного ущерба, затраты на переработку отходов и мониторинг полигонов, а также возможную прибыль от утилизации в единую целевую функцию совокупных потерь. Ее применение направлено на формализацию выбора управленческих решений в условиях ограниченного бюджета. В качестве примеров рассмотрены твердые коммунальные отходы и органическая составляющая отходов металлургических предприятий, для которых исходные параметры заданы по литературным источникам и экспертным данным. Проведенные расчеты позволили определить оптимальную долю переработки отходов для различных технологий, а также оценить влияние объема выделяемого бюджета на распределение ресурсов между переработкой и мониторингом. Модель продемонстрировала способность количественно оценивать совокупные потери, остаточный ущерб и эффективность альтернативных стратегий управления. Результаты показывают, что интеграция переработки и мониторинга в рамках риск-ориентированного подхода позволяет минимизировать общий ущерб и повысить устойчивость производственных систем. Практическая значимость работы заключается в возможности использования модели при технико-экономическом обосновании решений и разработке программ управления техногенной безопасностью промышленных предприятий.

**Ключевые слова:** стратегия обращения с отходами, промышленный объект, переработка отходов, мониторинг производственного процесса, стратегия переработки и контроля отходов, многопараметрическая модель управления отходами

**Для цитирования:** Гарелина С. А. Апробация многопараметрической модели оптимизации стратегии переработки отходов и мониторинга на промышленных объектах // Техносферная безопасность. 2026. № 1 (50). С. 83–99.

## APPROBATION OF A MULTIPARAMETRIC MODEL FOR OPTIMIZING WASTE RECYCLING AND MONITORING STRATEGIES AT INDUSTRIAL FACILITIES

Svetlana A. Garelina

Civil Defence Academy EMERCOM of Russia, Khimki, Russian Federation

**Abstract.** The article presents the approbation of a multiparametric model designed to optimize waste recycling strategies and organize monitoring at industrial facilities. The model integrates indicators of residual damage, the costs of waste recycling and landfill monitoring, as well as potential profits from utilization into a single objective function of total losses. Its application is aimed at formalizing the selection of management strategies under conditions of limited budgets. Case studies include municipal solid waste and the organic fraction of metallurgical waste, with initial parameters determined from literature sources and expert assessments. The calculations made it possible to determine the optimal share of waste recycling for different technologies and to evaluate the influence of the available budget on the allocation of resources between recycling and monitoring. The model demonstrated the ability to quantitatively assess total losses, residual damage, and the efficiency of alternative management strategies. The results show that integrating recycling and monitoring within a risk-oriented approach makes it possible to minimize overall losses and increase the resilience of industrial systems. The practical significance of the study lies in the model's applicability for techno-economic justification of decisions and for developing industrial safety management programs.

**Keywords:** waste treatment strategy, industrial facility, waste treatment, process monitoring, waste treatment and control strategies, multiparametric waste management model

**For citation:** Garelina S. A. Approbation of a multiparametric model for optimizing waste recycling and monitoring strategies at industrial facilities // *Technospheric safety*. 2026. No. 1 (50). Pp. 83–99.

## Введение

Обращение с отходами остается одной из основных проблем экологической и промышленной безопасности Российской Федерации. Масштабы их образования на протяжении последнего десятилетия демонстрируют устойчивую тенденцию к росту, что подтверждается результатами многочисленных исследований российских авторов (например, [1, 2]). Увеличение объемов отходов и их накопление при ограниченных возможностях переработки и мониторинга делают данное направление одним из наиболее актуальных в современной научной и практической повестке экологической безопасности. Особую актуальность приобретает проблема накопленного вреда и длитель-

ного воздействия на окружающую среду от объектов хранения и размещения отходов [3]. Многие такие объекты характеризуются износом инженерных конструкций, нарушением регламентов эксплуатации, отсутствием постоянного мониторинга и т. п., что повышает вероятность аварийных ситуаций и вторичных загрязнений.

Согласно аналитическим обзорам, реализация государственных программ и федеральных проектов в области обращения с отходами пока не обеспечивает требуемой результативности [1]. Рост объемов накопленных отходов свидетельствует о сохраняющемся дисбалансе между их образованием, переработкой и утилизацией, а также о недостаточной эффективности системы экологического мониторинга, что, по данным открытых

источников и сообщений СМИ, уже привело к ЧС техногенного характера.

В работах российских исследователей подчеркивается необходимость комплексного подхода, сочетающего экономические, технологические и экологические аспекты обращения с отходами (например, [1, 2]). Тем не менее большинство существующих моделей ориентировано преимущественно на оптимизацию затрат или оценку эффективности технологий переработки, не учитывая их взаимосвязь с системой управления производственными рисками, которая напрямую влияет на вероятность аварий и величину остаточного ущерба. В результате отсутствует инструмент, позволяющий сбалансировать затраты на переработку и мониторинг как основные меры по предупреждению ЧС в рамках общего бюджета предприятия.

В работе [4] была предложена многопараметрическая модель оптимизации стратегии переработки отходов и мониторинга на промышленных объектах, объединяющая эти направления в единую систему риск-ориентированного управления. Цель настоящей работы — апробация модели на примерах предприятий различного профиля и оценка эффективности стратегий

переработки и мониторинга при ограниченных ресурсах.

Научная значимость работы заключается в том, что она демонстрирует возможности перехода от теоретической постановки к практическому применению модели в условиях ограниченных ресурсов. Практическая ценность заключается в том, что полученные результаты могут использоваться при технико-экономическом обосновании стратегий обращения с отходами, а также при разработке программ управления техногенной безопасностью промышленных объектов.

Основное внимание в данной статье уделено не обоснованию исходных параметров, а демонстрации возможностей практического применения разработанной модели для оценки и сопоставления стратегий переработки отходов и организации мониторинга. Такой ракурс позволяет рассматривать модель не только как теоретическую конструкцию, но и как прикладной инструмент поддержки управленческих решений.

### Основная часть

Целевая функция совокупных потерь  $Z$  имеет вид

$$Z(x, M_{\text{техн}}, M_{\text{отх}}) = B_{\text{техн}}(M_{\text{техн}}) + B_{\text{отх}}(x, M_{\text{отх}}) + B_{\text{переработка}} + B_{\text{мониторинг}} - P(x), \tag{1}$$

где:

$x \in [0; 1]$  — доля переработанных отходов;

$M_{\text{техн}}, M_{\text{отх}} \in [0; 1]$  — уровень охвата мониторингом соответственно технологического процесса и полигонов;

$B_{\text{техн}}$  — ущерб в технологических процессах, снижающийся с ростом  $M_{\text{техн}}$ ;

$B_{\text{отх}}$  — ущерб на полигонах отходов, снижающийся с ростом  $M_{\text{отх}}$  и  $x$ ;

$B_{\text{переработка}}$  — затраты на переработку отходов;

$B_{\text{мониторинг}}$  — затраты на мониторинг;

$P(x) = P_{\text{max}} x$  — прибыль от переработки отходов;  $P_{\text{max}}$  — максимально возможная суммарная прибыль при 100%-й переработке.

$B_{\text{техн}}$  моделируется как линейно убывающая функция от уровня охвата мониторингом

$$B_{\text{техн}}(M_{\text{техн}}) = B_{\text{мактехн}}(1 - \alpha_{\text{техн}}M_{\text{техн}}), \tag{2}$$

а  $B_{\text{отх}}$  — мультипликативной зависимостью.

$$B_{\text{отх}}(x, M_{\text{отх}}) = B_{\text{махотх}}(1 - x)(1 - \alpha_{\text{отх}}M_{\text{отх}}), \tag{3}$$

где:

$\alpha_{\text{техн}}, \alpha_{\text{отх}} \in [0; 1]$  — коэффициент эффективности мониторинга, отражающий долю потенциального ущерба, который можно устранить при полном охвате мониторингом;

$B_{\text{мактехн}}, B_{\text{махотх}}$  — максимально возможный ущерб при аварийном развитии событий.

Затраты  $B_{\text{мониторинг}}$  от уровня охвата и эффективности систем мониторинга равны

$$B_{\text{мониторинг}} = r(B_{\text{мактехн}}\alpha_{\text{техн}}M_{\text{техн}} + B_{\text{махотх}}\alpha_{\text{отх}}M_{\text{отх}}), \tag{4}$$

где  $r$  — нормативный коэффициент.

Затраты  $B_{\text{переработка}}$  выражаются в виде аппроксимированной экспоненциальной функции

$$B_{\text{переработка}}(x) = B_{\text{п}}[(\exp(kx) - 1)/(\exp(k) - 1)], \tag{5}$$

где:

$B_{\text{п}}$  — общая (интегральная) стоимость полной переработки всего объема отходов (при  $x = 1$ );

$k$  — параметр насыщения.

Для объектов без технологического процесса модель упрощается

$$Z(x) = B_{\text{отх}}(x) + B_{\text{переработка}}(x) + B_{\text{мониторинг}}(M_{\text{отх}}) - P(x). \tag{6}$$

$$B_{\text{отх}}(x) = B_{\text{мак}} - (B_{\text{мак}} - B_{\text{мин}})x, \tag{7}$$

где:

$B_{\text{мониторинг}}$  фиксирована, т. е. включается как отдельная постоянная статья затрат;

$B_{\text{мак}}, B_{\text{мин}}$  — максимальный (при отсутствии утилизации) и минимальный (при полной переработке) ущерб.

### Оценка эффективности различных стратегий переработки твердых коммунальных отходов (ТКО)

В рамках моделирования рассматриваются два наиболее применимых подхода к переработке ТКО: термическая обработка (сжигание) и плазмохимическая переработка. Эти технологии широко обсуждаются в контексте снижения объемов захоронения и извлечения энергии из отходов. Термическая обработка характеризуется высокой степенью утилизации, но сопровождается выбросами

и требует дорогостоящих систем очистки. Плазмохимическая переработка обеспечивает более полное разрушение органических компонентов и меньший объем остатков, однако отличается высокой энергоемкостью и капитальными затратами. Для построения многопараметрической модели оптимизации стратегии обращения с ТКО использованы допущения, представленные в табл. 1. Все значения приведены в сопоставимых масштабах в расчете на один типовой объект по обращению с отходами мощностью 50–100 тыс. т/год.

**Таблица 1**  
**Допущения для двух стратегий переработки ТКО в рамках**  
**многопараметрической модели**

Table 1  
Assumptions for two municipal solid waste (MSW) recycling strategies within  
the multiparametric model

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
$B_{\max}$	1 млрд руб. billion RUB	Средняя величина ущерба при авариях на объектах размещения ТКО, по экспертным оценкам и анализу открытых источников, может составлять порядка 0,8–1,2 млрд руб. Диапазон определен на основе сопоставления с расчетами, приведенными в публичных отчетах и сообщениях о последствиях крупных аварийных ситуаций (в частности, на полигонах «Кучино» и «Ядрово»), и экстраполяции на объекты меньшего масштаба. При этом следует учитывать дополнительные, часто неучтенные расходы, связанные с дегазацией, рекультивацией и компенсационными мерами, которые могут существенно увеличивать общий экономический ущерб The average damage caused by accidents at municipal solid waste disposal facilities, according to expert estimates and analysis of open sources, is approximately 0.8–1.2 billion rubles. This range is determined based on a comparison with calculations presented in publicly available reports and media accounts of major waste management incidents (in particular, at the Kuchino and Yadrovo landfills) and by extrapolation to smaller-scale facilities. It should also be noted that there are additional, often unaccounted-for costs associated with degassing, reclamation, and compensation measures, which may significantly increase the total economic loss
$B_{\min}$	0,2 млрд руб. billion RUB	Остаточный ущерб в расчетах принят на уровне 20% от максимального возможного ущерба The residual damage in the calculations is assumed at the level of 20% of the maximum possible damage
Затраты на термическую переработку $B_{\text{переработка}}$ Expenditures for thermal waste treatment	0,5 млрд руб. billion RUB	При расчете стоимости переработки использованы усредненные значения, полученные на основе анализа данных, опубликованных перерабатывающими предприятиями и отраслевыми источниками. Согласно открытым сведениям, типичный диапазон затрат на переработку отходов составляет порядка 3–8 тыс. руб./т. Для объекта с годовым объемом 50–100 тыс. т ориентировочная стоимость переработки может быть оценена как $V_{\text{переработка}} = 60\,000 \text{ т} \cdot 6\,000 \text{ руб./т} = 360 \text{ млн руб.}$ In estimating the cost of waste processing, averaged values were used based on data published by processing companies and open industry sources. According to publicly available information, the typical cost range for waste processing is about 3–8 thousand RUB per ton. For a facility with an annual capacity of 50–100 thousand tons, the approximate processing cost can be expressed as $V_{\text{переработка}} = 60\,000 \text{ t} \times 6\,000 \text{ RUB/t} = 360 \text{ million RUB}$
Затраты на плазмохимическую переработку $B_{\text{переработка}}$ Expenditures for plasma-chemical waste treatment	0,75–0,8 млрд руб. billion RUB	Для плазмохимических технологий утилизации характерна существенно более высокая капиталоемкость по сравнению с традиционными термическими методами, что обусловлено сложностью оборудования и повышенными требованиями к энергообеспечению. В структуре себестоимости таких установок значительную долю занимают затраты на реакторы, источники питания, системы охлаждения и защиты, а также техническое обслуживание высокотемпературных узлов. В расчетах принято, что совокупная стоимость переработки при использовании плазмохимических технологий превышает аналогичные показатели для термических методов примерно в 1,5–2 раза

Окончание таблицы 1

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
Затраты на плазмохимическую переработку $V_{\text{переработка}}$ Expenditures for plasma-chemical waste treatment	0,75–0,8 млрд руб. billion RUB	Plasma-chemical waste treatment technologies are characterized by significantly higher capital intensity compared to conventional thermal methods, which is due to the complexity of the equipment and increased energy requirements. In the cost structure of such facilities, a considerable share is accounted for by expenditures on reactors, power supply systems, cooling and protection units, as well as maintenance of high-temperature components. In the calculations, it is assumed that the total cost of processing using plasma-chemical technologies exceeds the corresponding indicators for thermal methods by approximately 1.5–2 times
$P$	1. $P(x) = 0,2x$ млрд руб. 2. $P(x) = 0,3x$ млрд руб. billion RUB	Согласно литературным данным [5–7], при плазмохимической переработке ТКО возможен выход водорода в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен граммов на килограмм сырья, что для объекта мощностью около 50–100 тыс. т/год соответствует получению нескольких тонн водорода. Одновременно переработка сопровождается генерацией тепловой и электрической энергии, что позволяет учитывать энергетическую рекуперацию в расчетах совокупного эффекта. При учете средней рыночной стоимости водорода и частичного использования выделяющегося тепла (20–40 % от энергетического потенциала установки) совокупная компенсация эксплуатационных затрат может составлять порядка 0,1–0,25 млрд руб., что частично снижает интегральные издержки переработки According to literature data [5–7], plasma-chemical processing of municipal solid waste can yield hydrogen in the range of several tens to several hundred grams per kilogram of feedstock, which for a facility with an annual capacity of about 50–100 thousand tons corresponds to the production of several tons of hydrogen. At the same time, the process is accompanied by the generation of thermal and electrical energy, allowing for the inclusion of energy recovery in the overall efficiency assessment. Considering the average market price of hydrogen and partial utilization of the released heat (20–40 % of the plant's energy potential), the total compensation of operating costs may reach approximately 0.1–0.25 billion RUB, partially offsetting the integral processing expenses
$V_{\text{мониторинг}}$	0,1 млрд руб. billion RUB	В расчетах принята доля постоянных затрат на мониторинг в размере 10 %, что соответствует нижней границе интервала 10–25 % [4] In the calculations, the share of fixed monitoring costs is assumed to be 10 %, which corresponds to the lower boundary of the interval of 10–25 % [4]

Для термической технологии принят  $k = 2$ , так как ее эффективность снижается при высоких уровнях переработки: возрастает сложность доочистки, увеличиваются выбросы и энергозатраты, особенно при работе с остатками. Для плазмохимической технологии установлен  $k = 1,8$ , поскольку она более управляемая, обеспечивает глубокую

переработку и требует меньших затрат на завершающих этапах. Таким образом, более низкий  $k$  отражает экономическую и технологическую гибкость плазмохимии по сравнению с термической переработкой.

Расчет выполнен для долей переработки от 0 до 100 % для термической и плазмохимической переработки (табл. 2, рис. 1).

**Таблица 2**  
**Результаты расчета совокупных потерь при термической и плазмохимической переработке отходов на полигонах ТКО**

Table 2  
 Results of calculating total losses for thermal and plasma-chemical waste treatment at MSW landfills

Доля переработки отходов, $x$ Share of waste recycling $x$ , (%)	Термическая переработка Thermal treatment	Плазмохимическая переработка Plasma-chemical treatment	
		$P(x) = 0,2x$	$P(x) = 0,3x$
	$Z$ , млрд руб. $Z$ , billion RUB		
0	1,10	1,10	1,10
0,1	1,04	1,03	1,02
0,2	0,98	0,96	0,95
0,3	0,92	0,91	0,88
0,4	0,88	0,86	0,83
0,5	0,83	0,82	0,78
0,6	0,80	0,79	0,75
0,7	0,78	0,78	0,73
0,8	0,77	0,77	0,73
0,9	0,78	0,80	0,75
1,0	0,80	0,85	0,80

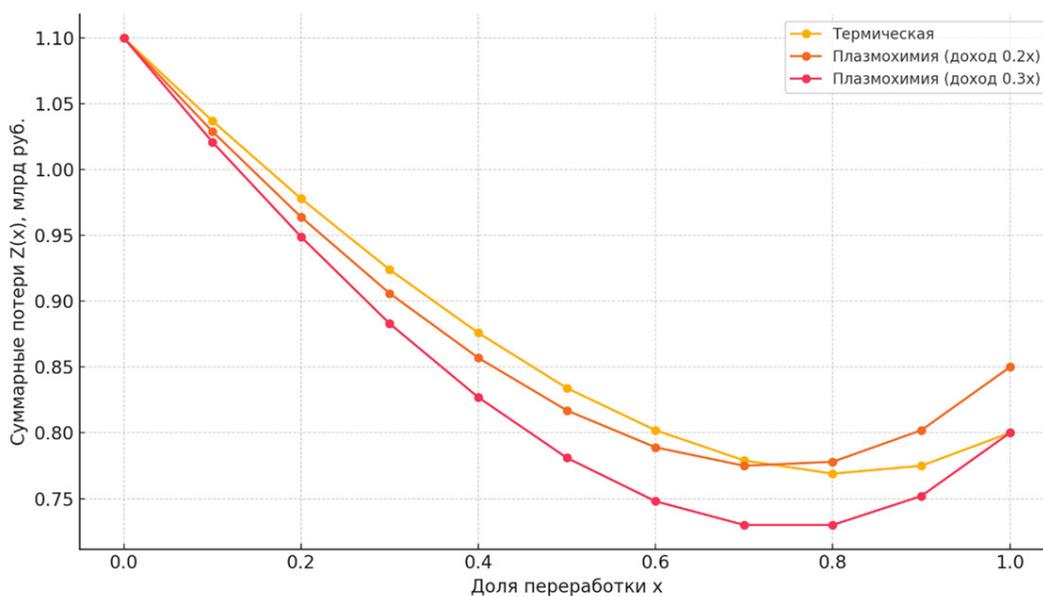


Рис. 1. Зависимость совокупных потерь от доли переработки отходов для двух стратегий (термической и плазмохимической)

Fig. 1. Dependence of total losses on the share of waste treatment for two strategies (thermal and plasma-chemical)

Из данных рис. 1 видно, что термическая переработка демонстрирует монотонное снижение совокупных потерь  $Z(x)$  при увеличении доли утилизации примерно до 80 %, где достигается минимум затрат. Лишь при дальнейшем росте переработки начинается незначительное увеличение затрат без существенного снижения остаточного ущерба, что указывает на точку насыщения экономической целесообразности. Следовательно, переработка до 80 % является оптимальной для термической технологии. Плазмохимическая технология с доходом  $0,2x$  оказывается экономически эффективнее термической при переработке в диапазоне до 70 % включительно, но уступает термической при переработке свыше 80 % из-за опережающего роста затрат. То есть, несмотря на доход, эффект компенсируется экспоненциальным удорожанием технологии. Плазмохимия с доходом  $0,3x$  демонстрирует наименьшие совокупные потери при переработке свыше 70 %, уверенно опережая обе альтернативные стратегии. Минимум затрат по интегральной модели достигается при переработке примерно до 70 %, что указывает на оптимальную зону, где достигается баланс между снижением ущерба и возвратом части затрат через продукцию.

Таким образом, оптимальной зоной переработки является диапазон до 70 %, где достигается баланс между снижением ущерба и возвратом затрат; при этом наибольшая эффективность достигается при использовании плазмохимии с доходом  $0,3x$ .

#### **Оптимизация стратегии переработки органической составляющей отходов металлургического предприятия**

Металлургическое производство относится к числу наиболее ресурсозатратных

и экологически напряженных отраслей промышленности, характеризующихся значительным объемом образования отходов различной природы [8, 9]. Опасность данных отходов обусловлена не только их объемом, но и токсикологическими свойствами. Токсичность и химическая активность металлургических шлаков и шламов обуславливает необходимость их инженерного контроля на всех стадиях обращения. В связи с этим комплексный мониторинг отходов и их переработки представляет собой основной элемент в обеспечении экологической безопасности металлургических предприятий. К органическим отходам металлургического производства относятся, прежде всего, нефтесодержащие и масляные отходы, образующиеся при смазке и охлаждении оборудования, а также шламы сточных вод и осадки очистных сооружений, содержащие растворенные органические вещества и продукты биологического разложения и др.

Учитывая эти угрозы, для минимизации ущерба и предупреждения ЧС необходимо внедрение средств мониторинга и контроля, охватывающих всю цепочку обращения с отходами.

В табл. 3 приведены допущения для многопараметрической модели металлургических предприятий, после чего представлены результаты соответствующих расчетов (табл. 4, рис. 2). Следует отметить, что в данном разделе рассматривается только органическая составляющая отходов, поскольку в расчетах учитывается плазмохимический метод их переработки. Для обеспечения сопоставимости и определенности результатов в расчетах приняты фиксированные значения параметров:  $k = 2$  и  $r = 0,3$ .

**Таблица 3**  
**Допущения для многопараметрической модели оптимизации стратегии обращения с отходами металлургических предприятий**

Table 3  
 Assumptions for the multiparametric model of optimizing the waste management strategy at metallurgical enterprises

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
$B_{\text{махтехн}}$	0,5 млрд руб. billion RUB	<p>Значение 0,5 млрд руб. принято исходя из обобщенного анализа масштабов и характера аварий на металлургических предприятиях. Для подобных объектов инциденты, как правило, локальны и контролируемы благодаря высоким стандартам промышленной безопасности и постоянному мониторингу, что обуславливает меньший уровень ущерба по сравнению с полигонами ТКО, где последствия имеют более масштабный и длительный характер</p> <p>The value of 0.5 billion RUB was adopted based on a generalized analysis of the scale and nature of accidents at metallurgical enterprises. In such facilities, incidents are typically local and controlled due to high standards of industrial safety and continuous monitoring, which results in a lower level of damage compared to municipal solid waste landfills, where the consequences are generally larger in scale and longer in duration</p>
$B_{\text{маходт}}$	0,5 млрд руб. billion RUB	<p>Полигоны отходов создают долговременные риски, при этом доля ущерба от технологических ЧС часто значительно выше, особенно на крупных металлургических комбинатах, где масштаб и интенсивность процессов приводят к серьезным авариям и значительным экономическим потерям. В модели максимальный ущерб при авариях на полигонах отходов принят равным 0,5 млрд рублей — так же, как и ущерб в технологическом процессе. Это упрощение сделано для определенности расчетов, учитывая, что реальный ущерб от аварий на полигонах может быть ниже, чем на ТКО, ввиду более высокого уровня контроля и локализованного характера инцидентов</p> <p>Waste disposal sites create long-term risks, while the share of damage from technological accidents is often significantly higher, especially at large metallurgical plants, where the scale and intensity of processes lead to serious accidents and substantial economic losses. In the model, the maximum damage from accidents at waste disposal sites is assumed to be 0.5 billion rubles — the same as for technological processes. This simplification was made for the sake of calculation clarity, taking into account that the actual damage from accidents at disposal sites may be lower than at MSW landfills due to a higher level of control and the localized nature of incidents</p>
$\alpha_{\text{техн}}$	0,5	<p>Значения параметров эффективности и охвата мониторингом заданы как калибруемые допущения, основанные на практике предприятий и инженерной оценке уровня управляемости рисков. Принятые параметры для технологического процесса отражают высокий потенциал предотвращения инцидентов при преимущественно непрерывном контроле критически важных узлов</p> <p>The values of monitoring efficiency and coverage parameters are defined as calibrated assumptions based on industrial practice and engineering assessment of the level of risk controllability. The adopted parameters for the technological process reflect a high potential for incident prevention under predominantly continuous control of critical units</p>
$M_{\text{техн}}$	0,7	

Окончание таблицы 3

Показатель Parameter	Принятое значение Assumed value	Обоснование Justification
$\alpha_{\text{техн}}$	0,3	Для полигона отходов принятые параметры отражают ограниченный уровень управляемости и фрагментарный характер контроля, при котором мониторинг охватывает лишь часть площади и технологических узлов, что снижает потенциал предотвращения инцидентов по сравнению с технологическим процессом For the waste landfill, the adopted parameters reflect a limited level of controllability and a fragmented nature of monitoring, where only part of the area and technological units are covered, resulting in a lower potential for incident prevention compared with the technological contour
$M_{\text{техн}}$	0,4	
$B_{\text{переработка}}$	0,6 млрд руб. billion RUB	Стоимость переработки органических отходов плазмохимическими методами оценивается в диапазоне 6 000–12 000 руб./т, что соответствует усредненным значениям, приведенным в открытых отраслевых источниках. Для типового перерабатывающего комбината с объемом до 100 000 т/год (органическая фракция отходов) совокупные затраты с учетом сложности технологического процесса, логистики, рекультивации и налоговых отчислений могут быть оценены как $B_{\text{переработка}} = 100\,000\ \text{т} \cdot 6\,000\ \text{руб./т} = 0,6\ \text{млрд руб.}$ The cost of processing organic waste using plasma-chemical methods is estimated to range from 6,000 to 12,000 RUB per ton, which corresponds to average values reported in open industry sources. For a typical processing plant with an annual capacity of up to 100,000 tons (organic waste fraction), the total expenditure — taking into account process complexity, logistics, land reclamation, and tax payments — can be estimated as $B_{\text{переработка}} = 100,000\ \text{t} \times 6,000\ \text{RUB/t} = 0.6\ \text{billion RUB}$

Умеренное снижение ущерба от технологического процесса достигается за счет эффективного мониторинга, что подчеркивает важность поддержания стабильных систем контроля в базовой производственной цепочке. Оптимальная доля переработки отходов находится в диапазоне 0,3–0,4, обеспечивая баланс между снижением ущерба и затратами, что является ключевым показателем для разработки эффективных стратегий обращения с отходами. Модель

подтверждает эффективность риск-ориентированного подхода, демонстрируя возможность почти двукратного снижения совокупных потерь при управлении переработкой и мониторингом по сравнению с отсутствием вмешательства. Полная переработка отходов снижает ущерб до минимальных значений, но приводит к росту суммарных потерь из-за высоких затрат, что подчеркивает необходимость поиска компромиссных решений и оптимизации процессов.

**Таблица 4**  
**Оценка ущерба, затрат на переработку и мониторинг при изменении доли переработки отходов**

Table 4  
Assessment of damage, recycling costs, and monitoring under varying shares of waste processings

$x$	$B_{\text{техн}}$ , млрд руб. billion RUB	$B_{\text{отх}}$ , млрд руб. billion RUB	$B_{\text{переработка}}$ , млрд руб. billion RUB	$B_{\text{мониторинг}}$ , млрд руб. billion RUB	$Z$ , млрд руб. billion RUB
0	0,33	0,44	0,00	0,07	0,84
0,1	0,33	0,40	0,01	0,07	0,80
0,2	0,33	0,35	0,02	0,07	0,77

Окончание таблицы 4

$x$	$V_{\text{техн}}$ , млрд руб. billion RUB	$V_{\text{отх}}$ , млрд руб. billion RUB	$V_{\text{переработка}}$ , млрд руб. billion RUB	$V_{\text{мониторинг}}$ , млрд руб. billion RUB	$Z$ , млрд руб. billion RUB
0,3	0,33	0,31	0,05	0,07	0,76
0,4	0,33	0,26	0,10	0,07	0,76
0,5	0,33	0,22	0,15	0,07	0,77
0,6	0,33	0,18	0,22	0,07	0,79
0,7	0,33	0,13	0,29	0,07	0,82
0,8	0,33	0,09	0,38	0,07	0,87
0,9	0,33	0,04	0,49	0,07	0,93
1,0	0,33	0,00	0,60	0,07	1,00

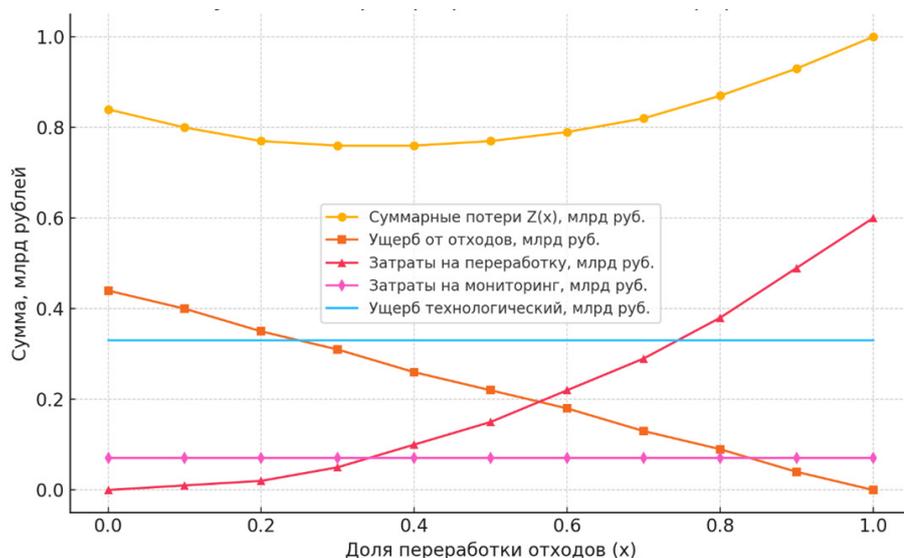


Рис. 2. Зависимость ущерба и затрат на переработку и мониторинг от доли переработки отходов  
 Fig. 2. Dependence of damage, recycling costs, and monitoring costs on the share of waste processed

Для оценки эффективности различных стратегий обращения с отходами на металлургических предприятиях была проведена сравнительная оценка совокупных потерь с учетом уровня переработки отходов, а также степени охвата мониторингом технологических процессов и полигонов. В табл. 5 и на рис. 3 представлены показатели по ущербу, затратам на переработку и мониторинг для шести стратегий обращения с отходами металлургических предприятий. Анализ результатов позволяет выявить оптимальные параметры управления, минимизирующие совокупные потери и риски.

Максимальное снижение ущерба, связанного с технологическим процессом,

достигается при полном уровне мониторинга ( $M_{\text{техн}} = 1$ ), что подчеркивает критическую роль интеллектуальных систем контроля для обеспечения устойчивости производственного цикла. Переработка отходов на уровне 50 % ( $x = 0,5$ ) существенно снижает экологический ущерб, особенно в сочетании с эффективным мониторингом полигонов, что свидетельствует о синергетическом эффекте интегрированного управления отходами и мониторинга. Стратегия полной переработки ( $x = 1$ ) сопровождается резким увеличением затрат, что ограничивает ее практическую применимость в условиях дефицита финансовых ресурсов и подчеркивает необходимость экономического анализа

при выборе оптимальных параметров обращения с отходами. Минимум совокупных потерь наблюдается при частичной переработке с высокой степенью мониторинга тех-

нологической цепочки ( $x = 0,5$ ,  $M_{\text{техн}} = 1$ ), что подтверждает важность сбалансированного подхода между экологическими и экономическими факторами.

**Таблица 5**  
**Показатели по ущербу, затратам на переработку и мониторинг для шести стратегий обращения с отходами металлургических предприятий**

Table 5  
Indicators of damage, recycling costs, and monitoring for six waste management strategies at metallurgical enterprises

Стратегия Strategy	$x$	$M_{\text{отх}}$	$M_{\text{техн}}$	$V_{\text{техн}}$ , млрд руб. billion RUB	$V_{\text{отх}}$ , млрд руб. billion RUB	$V_{\text{переработка}}$ , млрд руб. billion RUB	$V_{\text{мониторинг}}$ , млрд руб. billion RUB	$Z$ , млрд руб. billion RUB
Без переработки и с базовым мониторингом технологических процессов Without recycling and with basic monitoring of technological processes	0	0	0,5	0,38	0,5	0	0,04	0,91
Частичная переработка с базовым мониторингом технологических процессов и полигонов Partial recycling with basic monitoring of technological processes and landfills	0,5	0,5	0,5	0,38	0,31	0,15	0,06	0,89
Полная переработка с базовым мониторингом технологических процессов и расширенным мониторингом полигонов Full recycling with basic monitoring of technological processes and extended monitoring of landfills	1,0	1,0	0,5	0,38	0	0,6	0,08	1,06
Без переработки и с расширенным мониторингом технологических процессов Without recycling and with extended monitoring of technological processes	0	0	1,0	0,25	0,5	0	0,05	0,80
Частичная переработка с расширенным мониторингом технологических процессов и базовым мониторингом полигонов Partial recycling with extended monitoring of technological processes and basic monitoring of landfills	0,5	0,5	1,0	0,25	0,31	0,15	0,08	0,78

Окончание таблицы 5

Стратегия Strategy	$x$	$M_{отх}$	$M_{техн}$	$B_{техн}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{отх}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{переработка}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{мониторинг}'$ млрд руб. billion RUB	$Z$ , млрд руб. billion RUB
Полная переработка с расширенным мониторингом технологических процессов и полигонов Full recycling with extended monitoring of technological processes and landfills	1,0	1,0	1,0	0,25	0	0,6	0,10	0,95

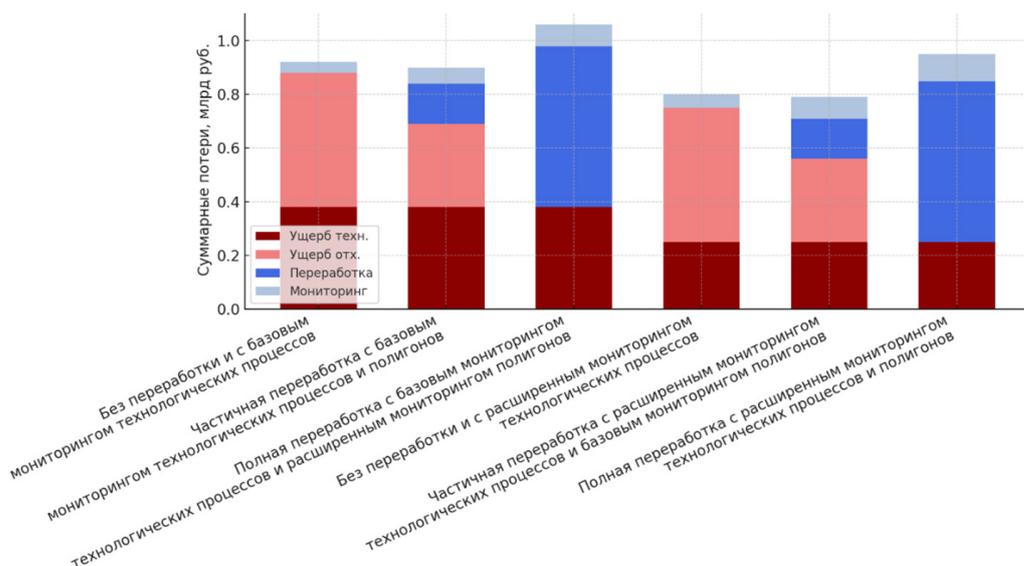


Рис. 3. Структура совокупных потерь при различных стратегиях переработки и мониторинга отходов

Fig. 3. Structure of total losses under different waste recycling and monitoring strategies

Разработанная модель демонстрирует эффективность риск-ориентированного управления, позволяющего на основе комплексного учета переработки, мониторинга и затрат минимизировать общий риск и потери на предприятиях металлургической отрасли.

В рамках работы стояла задача оптимального распределения выделенного бюджета  $B$  между тремя основными направлениями воздействия на снижение экологических и экономических рисков на металлургическом предприятии: мониторингом технологического процесса, мониторингом отходов и переработкой отходов. Основной целью было определить такие доли финан-

сирования каждого направления, которые при заданном общем лимите затрат обеспечат минимизацию совокупных потерь, включающих остаточный ущерб технологического процесса и отходов, а также расходы на мониторинг и переработку.

В связи с большой размерностью расчетных таблиц, содержащих 1331 комбинацию параметров, полное представление данных невозможно и затруднительно для восприятия. Полученные результаты проанализированы визуально с использованием трехмерных графиков (рис. 4, для примера  $B = 0,1$  млрд руб.), отражающих влияние параметров на итоговые экономические показатели.

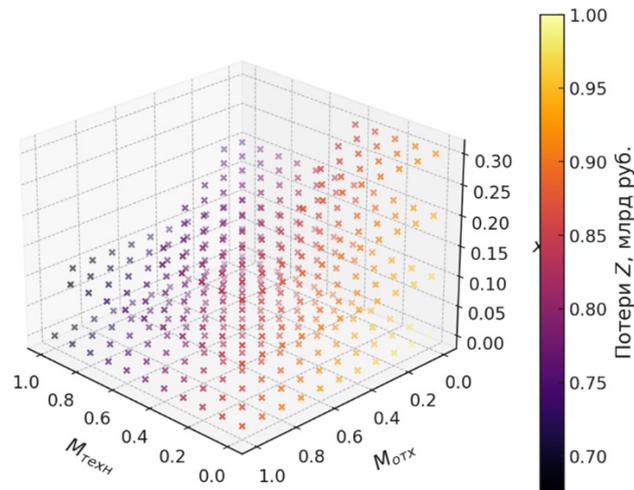


Рис. 4. Зависимость совокупных потерь Z от уровней мониторинга технологического процесса и отходов, а также доли переработки отходов при бюджете для примера  $B = 0,1$  млрд руб.

Fig. 4. Dependence of total losses Z on the levels of technological process monitoring, waste monitoring, and the share of waste recycling with a budget example of  $B = 0.1$  billion RUB

В табл. 6 приведены оптимальные значения уровней мониторинга технологического процесса и отходов, а также доли переработки отходов для различных уровней бюджета. Показаны соответствующие значения

остаточного ущерба, затрат на переработку и мониторинг, а также суммарные потери, что позволяет оценить эффективность различных стратегий управления в зависимости от выделяемых финансовых ресурсов.

**Таблица 6**  
**Оптимальные решения по распределению бюджета на мониторинг и переработку отходов металлургического предприятия**

Table 6  
Optimal solutions for budget allocation between monitoring and waste recycling at a metallurgical enterprise

$B$ , млрд руб. billion RUB	$M_{техн}$	$M_{отх}$	$\chi$	$B_{техн}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{отх}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{переработка}'$ млрд руб. billion RUB	$B_{мониторинг}'$ млрд руб. billion RUB	$Z$ , млрд руб. billion RUB
0,01	0	0,3	0	0,5	0,46	0	0,01	0,96
0,025	0,2	0,5	0	0,45	0,43	0	0,03	0,9
0,05	0,4	1	0	0,4	0,35	0	0,05	0,8
0,075	1	0,8	0	0,25	0,38	0	0,07	0,7
0,1	1	0,9	0,1	0,25	0,33	0,02	0,08	0,68
0,125	1	0,7	0	0,25	0,4	0	0,07	0,72
0,15	1	0,6	0	0,25	0,41	0	0,07	0,73
0,25	1	0,5	0,3	0,25	0,32	0,07	0,06	0,69
0,5	1	0,5	0,3	0,25	0,32	0,07	0,06	0,69
0,75	1	1	1	0,25	0	0,6	0,08	0,93
1	1	1	1	0,25	0	0,6	0,08	0,93

Исследование показало, что размер выделяемого бюджета существенно влияет на оптимальное распределение ресурсов между мониторингом технологического процесса, мониторингом отходов и переработкой отходов. При ограниченных бюджетах акцент смещается в пользу мониторинга отходов с минимальной или отсутствующей переработкой, что связано с высокой стоимостью переработки и необходимостью сохранять контроль за экологической ситуацией. При увеличении бюджета появляется возможность активнее инвестировать в переработку отходов, что снижает остаточный ущерб от их захоронения. Однако экономическая эффективность требует нахождения компромисса между затратами на переработку и мониторинг, поскольку переработка, особенно при высоких долях, ведет к экспоненциальному росту затрат. Минимальный бюджет, необходимый для обеспечения полной переработки всех отходов при полном мониторинге технологического процесса и отходов, оценивается примерно в 0,75 млрд рублей. Этот порог определен суммой максимальных затрат на переработку и мониторинг и служит техническим ориентиром для планирования финансирования. Для бюджетов ниже порогового значения оптимальной стратегией является частичная переработка отходов (около 30 %) при высоком уровне мониторинга. Это обеспечивает минимизацию совокупных потерь, сочетая снижение экологического ущерба с контролем затрат. Мониторинг технологического процесса и отходов остается ключевым элементом стратегии управления даже при ограниченном бюджете. Он позволяет существенно снижать остаточный ущерб и предупреждать аварийные

ситуации, особенно в условиях дефицита средств на полную переработку.

### **Заключение**

Разработана и апробирована многопараметрическая модель оптимизации стратегии переработки и мониторинга, которая интегрирует основные факторы управления техногенными рисками на промышленных объектах: долю переработки отходов, уровень охвата мониторингом технологических процессов и полигонов отходов, а также распределение ограниченного бюджета.

Модель учитывает остаточный ущерб как на технологических стадиях, так и на полигонах отходов, показывая, что его снижение возможно как за счет увеличения доли переработки, так и за счет расширения мониторинга. Эти меры действуют независимо, но в совокупности дают синергетический эффект, позволяющий более эффективно минимизировать совокупные потери.

Проведенные расчеты для твердых коммунальных и металлургических отходов подтвердили адекватность предложенной модели. Для ТКО оптимальная доля переработки зависит от применяемой технологии: при термической обработке минимум совокупных потерь достигается примерно при 80 %, при плазмохимической технологии с доходом 0,3х — при переработке свыше 70 %. Для металлургических предприятий (органическая составляющая отходов) минимальные совокупные потери наблюдаются при доле переработки 30–40 %, что связано с высокой стоимостью плазмохимических технологий и ограниченным эффектом

по снижению ущерба. Таким образом, модель позволяет количественно обосновывать диапазоны оптимальной переработки для различных типов отходов и стратегий, демонстрируя ее универсальность и прикладную ценность.

Оптимизация распределения бюджета показала, что приоритетное финансирование мониторинга технологических процессов в сочетании с частичной переработкой позволяет достичь наилучшего баланса между

снижением остаточного ущерба и экономической эффективностью.

Модель продемонстрировала высокую адаптивность и может применяться для обоснования решений по распределению ресурсов на промышленных объектах различного профиля. Она обеспечивает основу для разработки риск-ориентированных программ обращения с отходами, учитывающих как технологические особенности производства, так и ограничения бюджета.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шкодинский С. В., Рыкова И. Н., Юрьева А. А. Анализ существующей в России системы поддержки инвестиционных проектов в сфере обработки и утилизации отходов // Вестник Евразийской науки. 2021. № 5. URL: <https://clck.ru/3RkpwE> (дата обращения: 01.09.2025). DOI: 10.15862/02ECVN521
2. Крельберг А. Б. Алгоритм решения одной из задач экономики замкнутого цикла // Экономика промышленности (Экопром). 2024. Т. 17, № 2. С. 161–171. DOI: 10.17073/2072-1633-2024-2-161-171
3. Блоков И. П., Таргулян О. Ю., Усов Е. И. Накопленный вред окружающей среде: разрушения здоровья и бюджетов. М., 2020. 61 с.
4. Гарелина С. А. Многопараметрическая модель оптимизации стратегии переработки отходов и мониторинга на промышленных объектах // Техносферная безопасность. 2025. № 4 (49). С. 126–137.
5. Li H., Garelina S. A., Kazaryan M. A. Technological parameters of the discharger intended for the polymer recycling // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1145. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1145/1/012038> (accessed 01.09.2025).
6. Experimental study on microwave-assisted pyrolysis of oily sludge in a modified quartz tube reactor / S. Wang et al. // Journal of Composites Science. 2024. Vol. 5, No. 1. Art. 6. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4141/5/1/6> (accessed 01.09.2025).
7. IEA Bioenergy. Energy from waste: summary and conclusions. UNFCCC Secretariat, 2013. URL: <https://clck.ru/3RkpgY> (accessed 01.09.2025).
8. Валуев Д. В., Гизатулин Р. А. Технологии переработки металлургических отходов : учебное пособие. Томск, 2012. 196 с.
9. Piatak N. M., Parsons M. B., Seal R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. Pp. 236–266.

## REFERENCES

1. Shkodinsky S. V., Rykova I. N., Yurieva A. A. Analysis of the existing system for supporting investment projects in the field of waste processing and utilization in Russia // Bulletin of Eurasian Science. 2021. No. 5. URL: <https://clck.ru/3Rkove> (accessed 01.09.2025). DOI: 10.15862/02ECVN521
2. Krelberg A. B. Algorithm for solving one of the problems of circular economy // Industrial Economics (Ecoprom). 2024. Vol. 17. No. 2. Pp. 161–171. DOI: 10.17073/2072-1633-2024-2-161-171
3. Blokov I. P., Targulyan O. Yu., Usov E. I. Accumulated environmental damage: destruction of health and budgets. Moscow, 2020. 61 p.
4. Garelina S. A. Multiparameter model for optimizing waste processing and monitoring strategy at industrial facilities // Technosphere Safety. 2025. No. 4 (49). Pp. 126–137.
5. Li H., Garelina S. A., Kazaryan M. A. Technological parameters of the discharger intended for the polymer recycling // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1145. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1145/1/012038> (accessed 01.09.2025).
6. Experimental study on microwave-assisted pyrolysis of oily sludge in a modified quartz tube reactor / S. Wang et al. // Journal of Composites Science. 2024. Vol. 5, No. 1. Art. 6. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4141/5/1/6> (accessed 01.09.2025).
7. IEA Bioenergy. Energy from waste: summary and conclusions. UNFCCC Secretariat, 2013. URL: <https://clck.ru/3RkpgY> (accessed 01.09.2025).
8. Valuev D. V., Gizatulin R. A. Technologies for recycling metallurgical waste : Textbook. Tomsk, 2012. 196 p.
9. Piatak N. M., Parsons M. B., Seal R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: A review // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. Pp. 236–266.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**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](mailto:s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**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](mailto:s.garelina@agz.50.mchs.gov.ru)