

ПРИОРИТИЗАЦИЯ МЕР СНИЖЕНИЯ РИСКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С УЧЕТОМ ВКЛАДА СЦЕНАРИЕВ В ОБЩУЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ

Крецу Р.М., Рыбаков А.В.

Цель. Разработка количественной меры вклада сценариев чрезвычайных ситуаций (ЧС) в общую неопределенность риска техногенных ЧС на объектах топливно-энергетического комплекса, основанной на энтропии системы, информационной значимости отдельных сценариев и степени результативности защитных мер. Это позволит учитывать сценарии с малой вероятностью, но высоким информационным весом, и обеспечит рациональный выбор мер в условиях ограниченного бюджета.

Методы. В качестве основного метода используется информационно-энтропийный подход, позволяющий количественно оценить вклад каждого сценария чрезвычайной ситуации в общую неопределенность системы. Построена оптимизационная модель выбора защитных мер с учетом их результативности, стоимости и информационной значимости сценариев. Проведен численный эксперимент для оценки эффективности предложенного подхода в условиях ограниченного бюджета и множественных рисков.

Результаты. Результаты исследования показали, что использование информационной значимости сценариев позволяет формировать более эффективные стратегии распределения ресурсов. Предложенная модель обеспечивает снижение остаточного риска при меньших затратах по сравнению с классическими подходами. Численный эксперимент подтвердил применимость метода для обоснованного выбора защитных мер в условиях высокой неопределенности и ограниченного бюджета на предотвращение техногенных ЧС.

Область применения исследований. Разработанная модель может применяться в системах управления рисками на промышленных и инфраструктурных объектах, подверженных техногенным чрезвычайным ситуациям. Подход актуален для проектирования планов мероприятий гражданской защиты, обоснования инвестиций в безопасность, а также при разработке цифровых платформ поддержки решений в условиях ограниченных ресурсов и высокой неопределенности.

Ключевые слова: безопасность, чрезвычайные ситуации, риск-менеджмент, энтропийный анализ, оценка рисков, техногенные катастрофы, анализ неопределенности, предупреждение аварий.

(Поступила в редакцию 15 июля 2025 г.)

Введение

Управление рисками чрезвычайных ситуаций техногенного характера на опасных производственных объектах остается одной из ключевых задач обеспечения как национальной безопасности, так и устойчивого функционирования на уровне управления промышленными объектами. Особенно это актуально для объектов нефтегазового комплекса России, где даже единичная авария может вызвать тяжелые техногенные и экологические последствия, несмотря на принятые меры защиты.

Анализ статистики аварий на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) за период 2014–2023 гг., проведенный в исследовании [1], выявил противоречивую динамику: при снижении числа аварий с 23 до 9 в год (рис. 1) величина совокупного ущерба остается нестабильной, с пиковым значением 5,3 млрд рублей в 2020 г. При этом ежегодный объем инвестиций в защитные меры и мероприятия колебался в пределах 9,5–10,3 млн рублей, оставаясь практически неизменным.

Сопоставление ущерба и инвестиций в безопасность (рис. 2) показывает, что в среднем за период 2014–2023 гг. на 1 рубль вложений приходилось более 170 руб. ущерба, при этом в ряде лет показатель превышал 300 руб., что свидетельствует об ограниченной результативности текущих стратегий защиты.

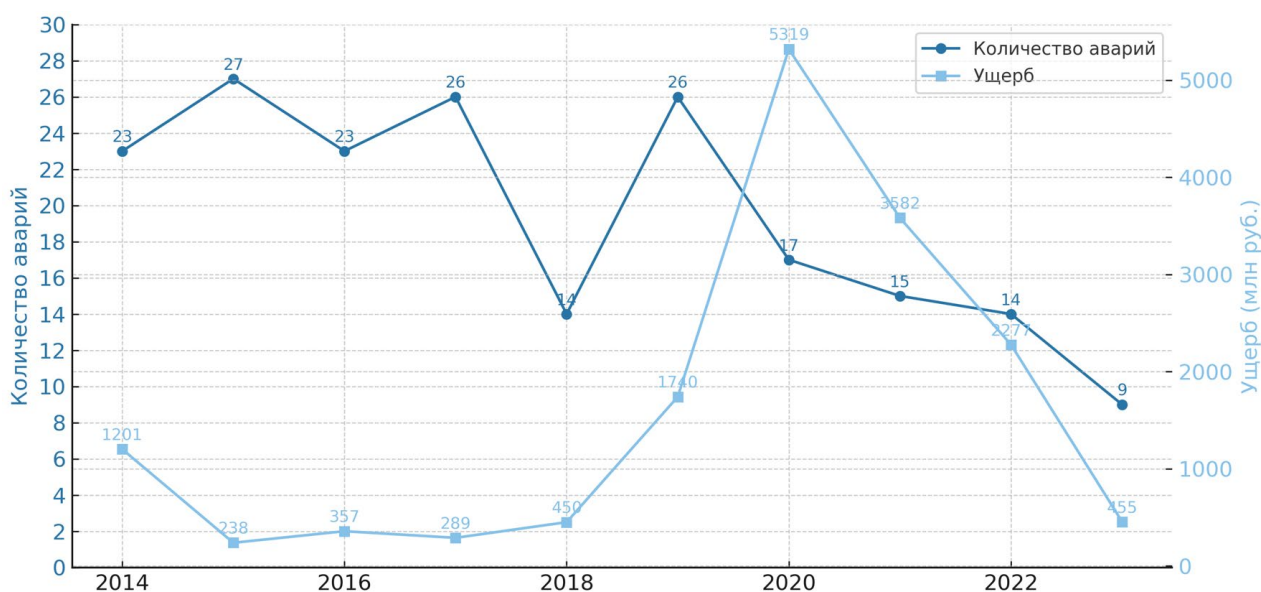


Рисунок 1. – Динамика аварий и ущерба на НПЗ России

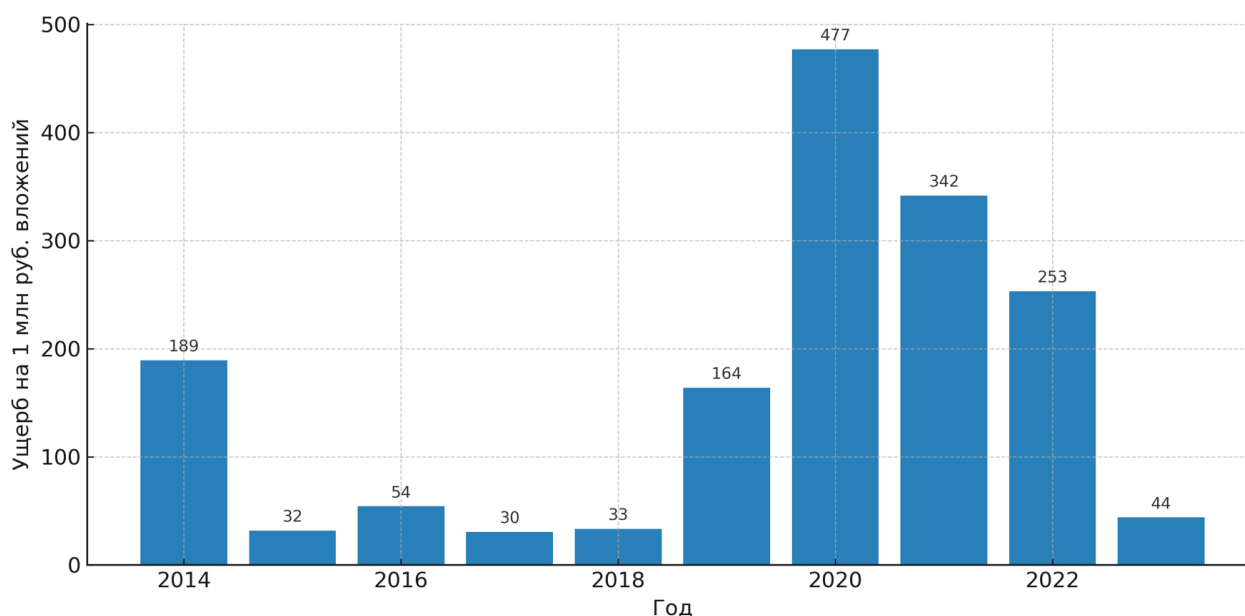


Рисунок 2. – Соотношение ущерба и инвестиций в обеспечение безопасности от ЧС

Несоответствие между вложениями и достигнутым уровнем защищенности свидетельствует о неэффективности универсальных подходов к выбору защитных мер, опирающихся на ретроспективную статистику и усредненные показатели. В реальности часть сценариев чрезвычайных ситуаций техногенного характера (далее – **сценарии ЧС**) остается недооцененной, несмотря на их потенциальную опасность. Это особенно характерно для редких, но информационно значимых сценариев ЧС, которые могут существенно повлиять на поведение системы в условиях неопределенности [2].

Современные исследования показывают, что ущерб от чрезвычайных ситуаций часто распределен по принципу *fat-tail* – *тяжелого хвоста*, где малочастотные, но высокоразрушительные события играют ключевую роль в совокупном риске. Это означает, что классические модели, ориентированные на средние значения, могут не учитывать критические сценарии ЧС. Так, в работе [3] показано, что ущерб от природных катастроф, включая пожары и промышленные взрывы, подчиняется степенному распределению с экспонентой около 1,5, а следовательно, имеет неограниченную дисперсию.

В классических статистических моделях, основанных на нормальном (гауссовом) распределении, большинство событий сосредоточены вокруг среднего значения, а вероятность отклонений резко падает. Такие распределения называют *тонкохвостыми* (*thin-tail*). Однако

в реальности – особенно в области чрезвычайных ситуаций – наблюдаются fat-tail распределения, в которых вероятность крайне разрушительных, редких событий существенно выше, чем предсказывает нормальное распределение. Как отмечает Дэвид Салазар¹, основное отличие такого распределения в том, что его дисперсия либо бесконечна, либо крайне нестабильна, что делает невозможным применение обычных метрик, таких как стандартное отклонение, для реального анализа риска.



Рисунок 3. – Наглядное сравнение нормальных и fat-tail распределений²

Например, при наличии тяжелого хвоста даже небольшая выборка данных может быть доминирована одним экстремальным значением (например, крупной аварией или катастрофой), которое будет определять всю структуру распределения. Это противоречит интуитивному понятию предсказуемости и требует принципиально иных методов – таких как энтропийный анализ, оценка информационной значимости сценариев ЧС и fat-tail устойчивые критерии приоритизации защитных мер.

Сходные выводы представлены и в недавнем исследовании, посвященном инцидентам на атомных станциях [4], где масштаб аварий имеет ярко выраженное fat-tail поведение. Даже единичные аварии способны вызвать цепные последствия, охватывающие всю сеть производства и снабжения. Кроме того, в работе [5] подчеркивается, что при наличии fat-tail любая традиционная система оценки эффективности затрат (СВА) становится неприменимой, т.к. ожидаемый ущерб стремится к бесконечности.

Подобные fat-tail паттерны характерны для техногенных аварий. Недавние исследования показывают, что несмотря на редкость таких событий, именно они формируют *тяжелый хвост* потерь, который традиционные методы недооценивают. Особенно это важно для систем, где:

- данные ограничены,
- ЧС случаются редко,
- но последствия катастрофичны.

Следствием является ситуация, когда частые, но слабые события вытесняют внимание и ресурсы, в то время как «редкие, но опасные» сценарии ЧС остаются недооцененными – несмотря на их высокий вклад в системную неопределенность. В такой ситуации просто увеличить бюджет недостаточно – необходимо перейти к методам, которые позволяют учитывать вклад сценариев ЧС в неопределенность системы и рационально распределять ресурсы в ее пользу.

В связи этим становится актуальным переход к методам, ориентированным не только на частотную вероятность и ущерб, но и на структуру неопределенности [6; 7] в системе оценки и управления риском ЧС техногенного характера. Использование информационно-энтропийного подхода позволяет формализовать вклад каждого сценария ЧС в общую энтропию и на этой основе приоритизировать защитные меры с учетом их реального влияния на устойчивость объекта. Кроме того, практическое подтверждение обоснованности такого подхода дают данные о техногенных авариях, произошедших в 2023 г. на промышленных

¹ Salazar, D. Standard deviation and fat tails / D. Salazar. – 2020. – URL: <https://david-salazar.github.io/posts/fat-vs-thin-tails/2020-05-13-standard-deviation-and-fat-tails.html> (date of access: 06.06.2025).

² См. сноску 1.

объектах, опубликованные Ростехнадзором³. Анализ показал, что две аварии – на объектах АО «Ачимгаз» и ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» – обеспечили более 70 % совокупного ущерба, несмотря на их единичный характер: общий ущерб от 21 аварии за 2023 г. составил около 800 млн рублей, при этом две аварии на объектах АО «Ачимгаз» (305 млн руб.) и ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» (290 млн руб.) доминировали в структуре ущерба, значительно превосходя остальные. Подобная структура ущерба иллюстрирует необходимость применения специфических методов оценки и управления рисками, которые учитывают влияние редких, но катастрофических событий. Это подчеркивает, что значительная часть остаточного риска формируется за счет небольшого числа редких, но крайне разрушительных сценариев ЧС, и именно они должны становиться фокусом приоритизации в рамках стратегии управления рисками чрезвычайных ситуаций на уровне производственного объекта при ограниченных ресурсах. Такая концентрация ущерба при редких событиях подтверждает наличие *тяжелого хвоста* распределения потерь, что обосновывает использование fat-tail модели для анализа техногенных рисков нефтеперерабатывающих предприятий.

На рисунке 4⁴ показано распределение ущерба от аварий в логарифмическом масштабе. Характерная линия на графике подтверждает наличие fat-tail распределения, что подчеркивает невозможность эффективного управления рисками только на основе средних значений.

Данный график отражает логарифмически ранжированное распределение ущерба от техногенных аварий за 2023 г. По оси X представлен ранг аварии (от наиболее разрушительной к наименее), по оси Y – величина ущерба в логарифмическом масштабе. В логарифмическом масштабе зависимость демонстрирует участок излома, отражающий переход от области частых малых событий к редким крупным. Этот участок характерен для систем с *тяжелым хвостом* (fat-tail), что подтверждает наличие асимметрии в распределении ущерба при техногенных рисках.

На практике это означает, что большинство аварий имели сравнительно незначительные экономические последствия, в то время как единичные события обеспечили непропорционально высокий ущерб. Такая форма распределения характерна для fat-tail (*тяжелых хвостов*) распределений, где вероятность крайне разрушительных событий существенно выше, чем предсказывают гауссовские модели.

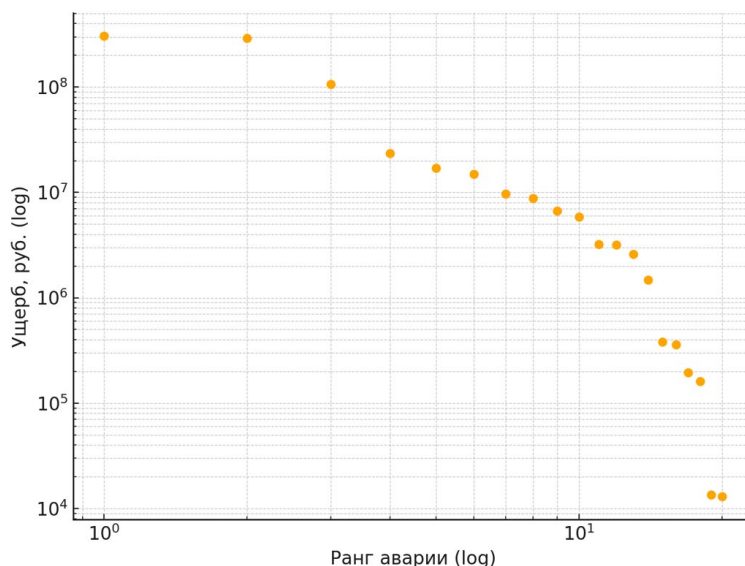


Рисунок 4. – Распределение ущерба от аварий за 2023 г. (логарифмический масштаб)

С точки зрения авторов, наличие *тяжелых хвостов* указывает на необходимость моделирования рисков не только по вероятности их наступления, но и по потенциалу ущерба, усиливая значимость информационно-энтропийного анализа и оценки остаточного риска в стратегическом управлении рисками ЧС производственного объекта.

³ Уроки, извлеченные из аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтедобывающей отраслей // Ростехнадзор: [сайт]. – URL: <https://gosnadzor.ru/industrial/oil/lessons/> (дата обращения: 29.03.2025).

⁴ Из 21 аварии, зафиксированной в 2023 г., 20 событий имели зарегистрированный ущерб, используемый для построения логарифмического и кумулятивного распределений. Одна авария с нулевым ущербом (по данным Ростехнадзора) была исключена из графиков ввиду невозможности логарифмического отображения значения.

На рисунке 5 отображен кумулятивный процент ущерба, из которого явно следует, что лишь несколько событий формируют подавляющую часть экономического ущерба.

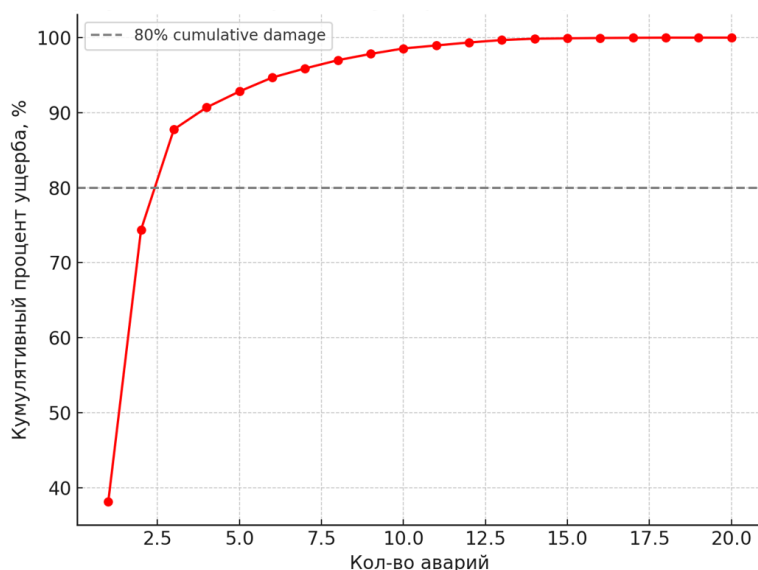


Рисунок 5. – Кумулятивный процент ущерба по авариям

Поведение графика подтверждает, что для целей рационального управления рисками ЧС на уровне производственного объекта важно не равномерное распределение ресурсов, а приоритизация защитных мер, направленных на предупреждение именно этих крайне разрушительных, хотя и редких, инцидентов.

Основная часть

Эффективное управление техногенными рисками требует не только учета вероятности реализации опасных событий, но и оценки их последствий с учетом неопределенности. При этом традиционные методы, основанные на вероятностно-статистических оценках, демонстрируют ограниченную применимость в условиях, где ключевую роль играют редкие, но высокоразрушительные сценарии ЧС для производственного объекта. В связи с этим все большее внимание уделяется использованию подходов, учитывающих асимметрию распределений ущерба и вклад отдельных событий в общую неопределенность.

Одним из ключевых понятий в современной концепции безопасности является остаточный риск – риск, сохраняющийся после внедрения комплекса защитных мер. Согласно международным стандартам [7] безопасность достигается не полной нейтрализацией угроз, а минимизацией остаточного риска до социально приемлемого уровня.

Формально остаточный риск R_r можно выразить через произведение остаточной вероятности реализации сценария ЧС P_r и остаточного ущерба S_r :

$$R_r = P_r \cdot S_r. \quad (1)$$

Для сравнения различных защитных мер применяется показатель их эффективности

$$E_i = (S_i^0 - S_i^r) / C_i, \quad (2)$$

где S_i^0 – ожидаемый ущерб до внедрения i -й защитной меры;

S_i^r – остаточный ущерб после внедрения i -й защитной меры;

C_i – затраты на реализацию i -й защитной меры.

Такая постановка позволяет оценивать эффективность затрат не абстрактно, а в контексте конкретных сценариев реализации рисков ЧС.

Применение энтропийных методов для анализа риска обосновано необходимостью учитывать не только количественные, но и структурные характеристики неопределенности. Энтропия в теории информации (К. Шеннон) позволяет оценить «информационную неопределенность» распределения вероятностей различных сценариев ЧС по формуле:

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \log_2 P_i. \quad (3)$$

Значение H служит индикатором распределенности рисков: при равномерной вероятности всех сценариев ЧС энтропия максимальна, при доминировании одного сценария ЧС – минимальна. Это позволяет вводить понятие информационной значимости сценария ЧС по формуле:

$$I_i = -P_i \cdot \log_2 P_i. \quad (4)$$

В ряде работ, например [3; 4], отмечается, что именно информационно значимые сценарии ЧС, даже с малой вероятностью, способны радикально изменить общую оценку риска и принятие решений.

Современные исследования [3–5] демонстрируют, что распределения ущерба от катастрофических событий – будь то аварии на НПЗ, выбросы токсичных веществ или взрывы – подчиняются fat-tail закону. Это означает, что вероятность крайне разрушительных событий существенно выше, чем прогнозируется нормальным распределением.

С точки зрения управления рисками ЧС это означает необходимость смещения фокуса от оценки среднего ущерба к выявлению редких, но критических сценариев ЧС, способных формировать непропорционально высокий вклад в общий риск.

Методика и математическая модель. В рамках поставленной задачи приоритизации защитных мер на опасных производственных объектах, подверженных техногенным чрезвычайным ситуациям, разработана модель, ориентированная на минимизацию совокупного остаточного риска (формула (5)) с учетом ограниченности бюджета, а также неопределенности и информационной значимости сценариев ЧС. Расчеты производятся по формулам, приведенным в таблице 1. Информационная значимость I_i выражается в битах и отражает вес сценария ЧС в общей неопределенности системы согласно подходу Шеннона.

Модель базируется на следующих исходных допущениях:

- система анализа охватывает конечное множество n сценариев ЧС;
- каждый i -й сценарий ЧС характеризуется исходной вероятностью реализации P_i , остаточной вероятностью после применения защитных мер P_i^r , характеризующихся результативностью k_i , ущербом до применения мер S_i^0 , остаточным ущербом после применения мер S_i^r , стоимостью мер C_i , и их эффективностью E_i ;
- бюджет на реализацию защитных мер ограничен значением B .

Таблица 1. – Основные расчетные показатели модели минимизации остаточного риска

Показатель	Формула	Интерпретация
Остаточный риск	$R_r = P_r \cdot S_r$	Риск после реализации меры, млн руб.
Эффективность защитной меры	$E_i = (S_i^0 - S_i^r) / C_i$	Ущерб, предотвращенный на единицу затрат, руб. ущерба / руб. затрат
Информационная значимость	$I_i = -P_i \cdot \log_2 P_i$	Вклад сценария ЧС в энтропию

Целевая функция имеет вид:

$$R_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n [\delta_i \cdot (P_i^r S_i^r) + (1 - \delta_i) \cdot (P_i S_i^0)], \quad (5)$$

где $\delta_i = 1$, если защитная мера для i -го сценария ЧС выбрана (используется остаточная вероятность P_i^r и остаточный ущерб S_i^r), и $\delta_i = 0$ – в противном случае (исходная вероятность P_i и ущерб до применения защитных мер S_i^0). При выборе защитной меры меняется не только ущерб, но и вероятность события.

Тогда оптимизационная модель общего остаточного риска при заданных ограничениях примет вид:

$$\min_{\delta_i} R_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n [\delta_i \cdot (P_i^r S_i^r) + (1 - \delta_i) \cdot (P_i S_i^0)]. \quad (6)$$

Ограничения:

1. Бюджет: $\sum_{i=1}^n \delta_i C_i \leq B$.
2. Двоичное ограничение на выбор меры: $\delta_i \in \{0; 1\}$, $i = \overline{1, n}$.
Приоритет предоставляется тем мерам, которые обладают:
 - высокой информационной значимостью I_i ;
 - высокой эффективностью E_i ;
 - способностью существенно снижать энтропию распределения рисков.

Для удобства интерпретации интегральный критерий $I_i \cdot E_i$ обозначим как показатель совокупной полезности U_i , отражающий вклад защитной меры в снижение остаточного риска. В силу (2) и (4) количественно совокупную полезность можно представить выражением:

$$U_i = (-P_i \cdot \log_2 P_i) \cdot (S_i^0 - S_i^r) / C_i. \quad (7)$$

Таким образом, U_i характеризует совокупный вклад меры в снижение остаточного риска и энтропии системы при ограниченных ресурсах. Показатель введен исключительно для удобства аналитической интерпретации совокупного эффекта мер и не используется в дальнейших расчетах модели.

Алгоритм реализации

1. Инициализация: задать вероятности P_i , ущербы S_i^0 , S_i^r , затраты C_i , определить бюджет B .
2. Вычисление: рассчитать значения R_i , I_i , E_i .
3. Сортировка: упорядочить сценарии ЧС по убыванию I_i , E_i .
4. Формирование набора защитных мер: выбрать защитные меры по убыванию значимости при соблюдении бюджетного ограничения.
5. Оптимизация: минимизировать $R_{\text{общ}}$.
6. Анализ остаточной энтропии H для оценки степени неопределенности после выбора защитных мер.

Результаты анализа и расчетов. Для демонстрации работы предложенной модели был проведен численный эксперимент, основанный на условных данных по 8 возможным сценариям ЧС на промышленном объекте нефтепереработки (табл. 2). Все сценарии ЧС различаются по вероятности реализации, потенциальному ущербу, стоимости защитных мер и их результативности. Ограничение бюджета составляет 12 млн руб.

Для формирования исходных данных таблицы 2 проведен анализ аварийности на предприятиях нефтегазового комплекса России по материалам Ростехнадзора за 2018–2023 гг. На основании повторяющихся типов событий выделены восемь типовых сценариев ЧС, а их исходные вероятности рассчитаны по статистике 2021–2023 гг. как наиболее репрезентативного периода, отражающего современный уровень промышленной безопасности. Такой подход обеспечивает сопоставимость данных и соответствует методическим рекомендациям Ростехнадзора, а значения ущерба до защитных мер отражают усредненные потери по каждому классу событий.

Таблица 2. – Основные расчетные показатели модели минимизации остаточного риска

№	Сценарий ЧС	Вероятность P_i	Ущерб, млн руб.		Стоимость меры C_i , млн руб.	Эффективность E_i	Информационная значимость I_i
			до защитных мер S_i^0	после защитных мер S_i^r			
1	Пожар на резервуаре	0,18	150	90	2,5	24,0	0,445
2	Взрыв в цехе	0,07	400	250	3,5	42,9	0,268
3	Отказ КИПиА	0,20	50	30	1,0	20,0	0,464
4	Утечка токсичных газов	0,05	300	120	2,5	72,0	0,216
5	Массовое возгорание	0,03	500	200	4,0	75,0	0,151
6	Авария трубопровода	0,17	100	60	2,0	20,0	0,435
7	Электросбой	0,25	40	25	0,8	18,8	0,500
8	Попадание молнии	0,05	120	90	1,2	25,0	0,216

Выбор оптимального набора защитных мер. На основании совокупного критерия $I_i \cdot E_i$ при соблюдении бюджетного ограничения (12 млн руб.) выбраны следующие защитные меры: для сценариев ЧС 1, 2, 5 и 6 (табл. 4). Для проверки обоснованности выбора сценариев была проведена проверка альтернативных комбинаций защитных мер с расчетом остаточного риска для каждого набора. Сравнивались три варианта:

- текущий выбор: сценарии 1, 2, 5, 6 (общая стоимость – 12 млн руб., обеспечивает наименьший остаточный риск – 75,32 млн руб.);
- альтернатива 1: сценарии 2, 4 (10 млн руб., совокупный остаточный риск составил 99,1 млн руб.);
- альтернатива 2: сценарии 1, 4, 5 (11,8 млн руб., остаточный риск – 82,65 млн руб.).

Выбор сценария 6 вместо 4 обусловлен бюджетным ограничением: реализация защитной меры для сценария 4 (2,5 млн руб.) при включении в набор превысила бы лимит.

Суммарный остаточный риск до применения защитных мер:

$$R_0 = \sum_{i=1}^8 P_i S_i^0 = 0,18 \cdot 150 + \dots + 0,05 \cdot 120 = 128 \text{ млн руб.}$$

Коэффициенты результативности k_i в модели отражают долю остаточного риска после внедрения защитных мер по каждому сценарию.

Их значения определяются на основе классификации защитных мер по категориям, учитывающей глубину воздействия на источник опасности или последствия. В работе используется пятиуровневая классификация, представленная в таблице 3.

Таблица 3. – Категории результативности защитных мер [6]

Категория	Тип защитных мер	Результативность R_i	Остаточный риск $k_i = 1 - R_i$
I	Исключение опасности (например, демонтаж источника)	1,0	0,0
II	Снижение опасного фактора до безопасного уровня	0,9–1,0	0,0–0,1
III	Конструктивные меры (дублирование, резервирование, ограждения)	0,7–0,9	0,1–0,3
IV	Информационные и организационные меры (обучение, допуски, сигнализация)	0,6–0,8	0,2–0,4
V	Реагирующие меры (ПЛАРН ⁵ , ПЛАС ⁶ , СИЗ ⁷)	0,3–0,5	0,5–0,7

При формировании набора защитных мер для оптимизации коэффициенты k_i присваиваются экспертно на основе:

- исторических данных по аналогичным объектам и событиям;
- моделирования последствий внедрения мер;
- оценки снижения уязвимости объекта на основе категорий.

Если защитная мера не применяется, считается $k_i = 1$ (риск сохраняется полностью). Так, для сценария ЧС 4 защитная мера не выбрана из-за бюджетного ограничения, поэтому указанный коэффициент принимается равным 1.

Скорректированные вероятности реализации сценариев ЧС после применения защитных мер (табл. 4) рассчитываются по формуле:

$$P_i^r = P_i \cdot k_i.$$

Таблица 4. – Совокупный приоритет сценариев ЧС и расчет остаточных вероятностей после реализации защитных мер

№ сценария ЧС	Показатель совокупной полезности $U_i = I_i \cdot E_i$	P_i (до защитных мер)	k_i (результативность защитных мер)	P_i^r (после защитных мер)
1	10,68	0,18	0,7	0,126
2	11,49	0,07	0,6	0,042
3	9,28	0,20	1	0,200
4	15,55	0,05	1	0,050
5	11,33	0,03	0,8	0,024
6	8,70	0,17	0,75	0,128
7	9,40	0,25	1	0,250
8	5,40	0,05	1	0,050

После применения выбранных защитных мер остаточный риск по выбранным сценариям ЧС (1, 2, 5, 6) составил 34,325 млн руб., а риск по оставшимся сценариям (3, 4, 7, 8), для которых меры не применялись, – 41 млн руб.:

$$R_r = \sum_{\substack{i=1 \\ \delta_i=1}}^n P_i^r S_i^r + \sum_{\substack{i=1 \\ \delta_i=0}}^8 P_i S_i^0 = 34,325 + 41 = 75,325 \text{ млн руб.}$$

⁵ ПЛАРН – план ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов.

⁶ ПЛАС – план локализации и ликвидации аварийных ситуаций.

⁷ СИЗ – средства индивидуальной защиты.

Снижение остаточного риска составило примерно 41 %, несмотря на реализацию защитных мер только по половине сценариев ЧС.

На рисунке 6 сравнение ожидаемого ущерба по всем восьми рассмотренным сценариям техногенных ЧС до и после реализации защитных мер.

Как видно из диаграммы, наибольший вклад в совокупный риск до применения мер обеспечивают сценарии ЧС 1, 2 и 4–6, что соответствует концепции fat-tail – распределение, в котором малая часть сценариев обуславливает большую часть ущерба.

Реализация защитных мер в приоритетных сценариях ЧС (1, 2, 5, 6) позволила существенно снизить остаточный риск именно в тех точках, где его концентрация была наибольшей, в то время как оставшиеся сценарии сохранили исходные уровни ущерба.

Визуальное сопоставление до и после позволяет продемонстрировать эффективность стратегии приоритизации на основе совокупного критерия $I_i \cdot E_i$ при ограниченном бюджете.

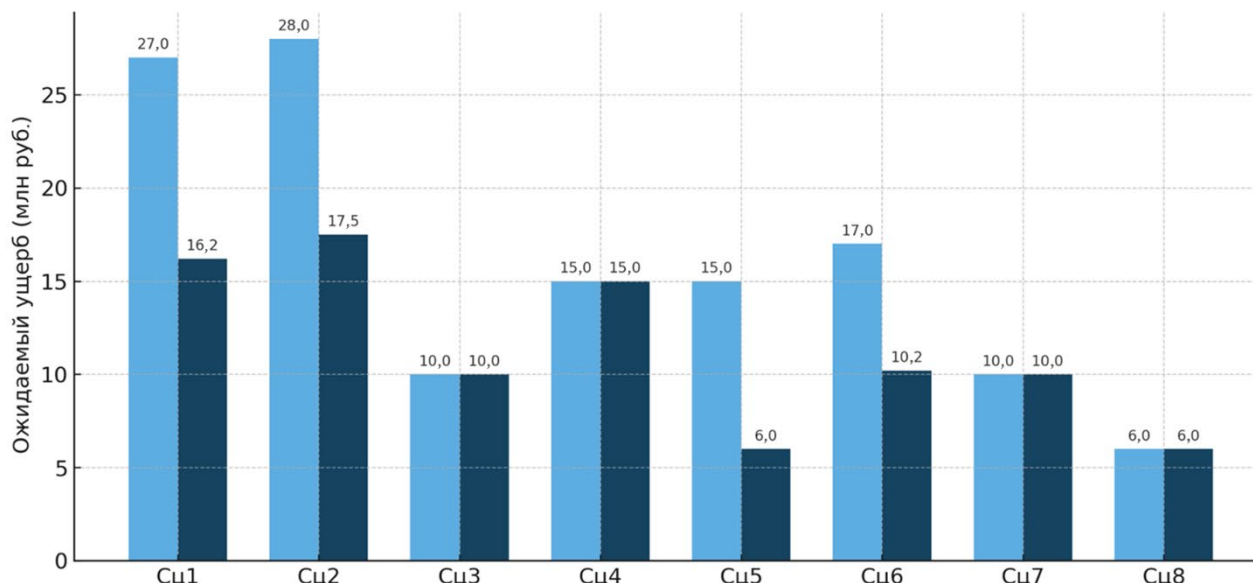


Рисунок 6. – Распределение ущерба по сценариям ЧС: до (■) и после (■) применения защитных мер

После приоритизации, направленной на «обрезание хвоста», происходит перераспределение – остаточная энтропия снижается, а вклад редких катастрофических сценариев ЧС в совокупный остаточный риск сокращается почти вдвое.

Энтропийный эффект. Исходная энтропия:

$$H_0 = -\sum_{i=1}^n P_i \cdot \log_2 P_i = 2,736 \text{ бита.}$$

Для выбранных сценариев ЧС (1, 2, 5, 6) зададим значения результативности защитных мер для снижения вероятности k_i , выбранные экспертным путем и отражающие ожидаемую результативность мер по снижению вероятности реализации сценариев ЧС (табл. 3):

Сценарий ЧС 1: $k_1 = 0,7 \rightarrow P_1^r = 0,18 \cdot 0,7 = 0,126$.

Сценарий ЧС 2: $k_2 = 0,6 \rightarrow P_2^r = 0,07 \cdot 0,6 = 0,042$.

Сценарий ЧС 5: $k_5 = 0,6 \rightarrow P_5^r = 0,03 \cdot 0,8 = 0,024$.

Сценарий ЧС 6: $k_6 = 0,75 \rightarrow P_6^r = 0,17 \cdot 0,75 = 0,1275$.

После применения мер (изменение вероятностей за счет снижения реалистичности сценариев ЧС):

$$H_r \approx 2,525 \text{ бита.}$$

Таким образом, уровень неопределенности системы снизился на 7,7 %, что подтверждает то, что реализация защитных мер влияет не только на величину остаточного риска, но и на структуру неопределенности сценариев ЧС, перераспределяя вероятности между событиями.

Из диаграммы видно, что реализация защитных мер по четырем сценариям ЧС, отобранным в результате оптимизации, обеспечила заметное снижение ожидаемого ущерба в каждом из этих сценариев: от 25 до 50 % в абсолютных значениях, что подтверждает высокую результативность подхода.

Сравнение столбцов «до» и «после» иллюстрирует вклад каждого конкретного сценария ЧС в общее снижение остаточного риска. Совокупный остаточный риск составил 75,3 млн руб., что соответствует снижению на 41,2 % по сравнению с исходным значением 128 млн руб.

Приоритизация по критерию $I_i \cdot E_i$ позволяет достигнуть наилучшего соотношения между снижением ущерба, энтропией и бюджетом. Данный подход обеспечивает целевое воздействие на наиболее опасные и неопределенные элементы системы.

Использование критерия $I_i \cdot E_i$ обосновано как компромисс между двумя ключевыми характеристиками сценария ЧС: его вкладом в общую неопределенность (энтропийная значимость) и экономической эффективностью защитной меры. Выбор произведения позволяет балансировать приоритизацию, избегая крайностей: например, меры с высокой информационной значимостью, но неэффективные по затратам или, наоборот, дешевые меры для мало-значимых сценариев. Для верификации проведено сравнение с аддитивной моделью приоритизации ($\alpha I_i + \beta E_i$), где α, β – весовые коэффициенты. Результаты показали, что модель с произведением более чувствительна к выбросам в структуре риска (fat-tail сценарии), что соответствует цели минимизации остаточного риска в условиях высокой неопределенности.

Для проверки устойчивости результатов был проведен сценарный анализ с варьированием бюджета и вероятностей (табл. 5). Предложенный подход позволяет учитывать качественные особенности мер, их глубину воздействия на систему риска и устойчивость результатов к вариации исходных параметров. Модель демонстрирует стабильность оптимального выбора при изменениях вероятностей и бюджета.

Проведенный анализ устойчивости подтверждает надежность предложенной модели. При увеличении бюджета на 15 % в оптимальный набор добавляется защитная мера по сценарию ЧС 4, что дает дополнительное снижение риска на 12 %. При сокращении бюджета на 15 % из набора исключается менее приоритетная мера, риск возрастает на 18 %. Варьирование вероятностей на ± 20 % не изменяет оптимальный набор защитных мер (1, 2, 5, 6), а колебание итогового риска не превышает ± 9 %. Это свидетельствует о стабильности модели при изменении как экономических, так и вероятностных параметров.

Таблица 5. – Сценарный анализ с варьированием бюджета и вероятностей

Параметр	Изменение	$R_{\text{общ}}$, млн руб.	$\Delta R_{\text{общ}}$	Оптимальный набор мер
Базовый сценарий	–	75,32	–	
Бюджет	+15 % (13,8 млн руб.)	66,28	–12 % риска	1, 2, 4, 5, 6
Бюджет	–15 % (10,2 млн руб.)	88,91	+18 % риска	1, 2, 5
Вероятности	± 20 % случайное варьирование	68,50–82,10	± 9 % риска	стабилен: 1, 2, 5, 6

Обсуждение результатов. Проведенный численный эксперимент продемонстрировал высокую эффективность предложенного подхода к приоритизации защитных мер на основе совмещенного критерия, учитывающего как эффективность меры, так и информационную значимость соответствующего сценария ЧС. Данный критерий позволил не только достичь значительного сокращения остаточного риска при ограниченном бюджете, но и обеспечить целенаправленное снижение неопределенности в системе за счет воздействия на наиболее критичные и недостаточно учтенные сценарии.

Снижение энтропии на ≈ 12 % в результате оптимизации подтверждает, что модель воздействует не только на численные значения ущерба, но и на качественные параметры системы риска. Это особенно важно для объектов, находящихся в условиях высокой технологической неопределенности, где даже малое изменение вероятности реализации сценария может иметь стратегические последствия.

Заключение

Управление техногенными рисками в современных условиях требует перехода от статических и усредненных моделей к более гибким, адаптивным и чувствительным к структуре неопределенности подходам. В рамках статьи предложен интегральный показатель значимости сценариев ЧС, который объединяет вклад в энтропию, ущерб и остаточную вероятность, позволяя формализовать отбор защитных мер в условиях ограниченного бюджета. Разработанная модель приоритизации защитных мер демонстрирует, как интеграция энтропийного анализа с экономической оценкой эффективности мер позволяет не только снижать ущерб, но и системно управлять распределением рисков.

Особенно важно, что модель учитывает ключевой структурный фактор – fat-tail природу распределения ущерба, характерную для чрезвычайных ситуаций на объектах с повышенной опасностью. За счет акцента на информационно значимые, но маловероятные сценарии ЧС достигается оптимизация не только в числовом, но и в стратегическом смысле – устойчивость объекта к редким, но катастрофическим событиям возрастает.

Несмотря на эффективность предложенной модели, ее применение ограничено зависимостью от экспертных оценок входных параметров (вероятностей, ущербов, результативности), без учета корреляций между сценариями ЧС и статичностью в условиях динамично меняющейся среды. Перспективным направлением развития является создание обучаемой версии модели с интеграцией байесовских методов обновления параметров на основе данных мониторинга аварий, результативности внедренных мер. Это позволит реализовать адаптивное управление рисками с непрерывной перекалибровкой приоритетов, минимизируя влияние редких событий за счет сочетания машинного обучения для частых сценариев и симуляционного моделирования для катастрофических «черных лебедей», а интеграция с цифровыми двойниками объектов обеспечит предиктивную оценку эффективности мер до их внедрения.

Практическая значимость заключается в возможности адаптации модели под конкретные условия предприятия и отрасли, с последующим включением в автоматизированные системы поддержки принятия решений в области промышленной и техносферной безопасности. Использование обучаемых компонентов дополнительно усиливает потенциал модели, позволяя учитывать изменяющиеся условия и историю реализации сценариев ЧС, что делает ее особенно актуальной для применения в условиях неопределенности и ограниченности ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбаков, А.В. Разработка методики по обоснованию перечня мероприятий по снижению ущерба от возможных аварий на нефтеперерабатывающих объектах / А.В. Рыбаков, П.А. Янышев // Техносферная безопасность. – 2025. – № 1 (46). – С. 153–164. – EDN: XBESOM.
2. Fedorets, A. Current concept of risk: the higher the probability of an event, the lower the risk / A. Fedorets // Reliability: Theory & Applications. – 2024. – Vol. 19. – Special Issue № 6 (81). – Part I. – P. 88–95. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/current-concept-of-risk-the-higher-the-probability-of-an-event-the-lower-the-risk> (date of access: 06.06.2025).
3. Jo, H.-H. Large variance and fat tail of damage by natural disaster / H.-H. Jo, Y.-L. Ko // Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Analysis, Modeling, and Management: proceedings of the 2nd International conference on vulnerability and risk analysis and management (ICVRAM 2014) and the 6th International symposium on uncertainty modeling and analysis (ISUMA 2014), Liverpool, United Kingdom, July 13–16, 2014. – Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014. – P. 2744–2752. – DOI: 10.1061/9780784413609.277.
4. Chen, W. Invulnerability analysis of nuclear accidents emergency response organization network based on complex network / W. Chen, S. Zou, C. Qiu, J. Dai, M. Zhang // Nuclear Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 56, No. 8. – P. 2923–2936. – DOI: 10.1016/j.net.2024.02.053.
5. Weitzman, M.L. Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change / M.L. Weitzman // Review of Environmental Economics and Policy. – 2011. – Vol. 5, No. 2. – P. 275–292. – DOI: 10.1093/reep/rer006.
6. Крецу, Р.М. Энтропийный анализ чрезвычайных ситуаций техногенного характера: методология и практическое применение / Р.М. Крецу, А.В. Рыбаков // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 4. – С. 451–461. – DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-4.451. – EDN: YGDFUJ.
7. Risk management – Principles and guidelines: ISO 31000:2009. – Geneva: International Organization for Standardization, 2009. – 24 p.

**Приоритизация мер снижения рисков техногенных чрезвычайных ситуаций
с учетом вклада сценариев в общую неопределенность**

**Prioritization of measures to reduce the risks of man-made emergencies taking into account
the contribution of scenarios to overall uncertainty**

Крещу Ромина Маратовна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный социальный университет», факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, кафедра экологии и природоохранной деятельности, аспирант

Адрес: ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1,
129226, г. Москва, Россия

Email: r.m.kretsu@yandex.ru

SPIN-код: 8973-2818

Romina M. Kretsu

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Social University», Faculty of Comprehensive Security and Basics of Military Training, Chair of Ecology and Environmental Protection Activities, postgraduate student

Address: Wilhelm Pieck str., 4, building 1,
220118, Moscow, Russia

Email: r.m.kretsu@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

Рыбаков Анатолий Валерьевич

доктор технических наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный социальный университет», факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, кафедра экологии и природоохранной деятельности, профессор

Адрес: ул. Вильгельма Пика, 4, стр. 1,
129226, г. Москва, Россия

Email: a.rybakov@agz.50.mhs.gov.ru

SPIN-код: 8654-3788

Anatoliy V. Rybakov

Grand PhD in Technical Sciences, Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Social University», Faculty of Comprehensive Security and Basics of Military Training, Chair of Ecology and Environmental Protection Activities, Professor

Address: Wilhelm Pieck str., 4, building 1,
220118, Moscow, Russia

Email: a.rybakov@agz.50.mhs.gov.ru

ORCID: 0000-0002-4037-1231

PRIORITIZATION OF MEASURES TO REDUCE THE RISKS OF MAN-MADE EMERGENCIES TAKING INTO ACCOUNT THE CONTRIBUTION OF SCENARIOS TO OVERALL UNCERTAINTY**Kretsu R.M., Rybakov A.V.**

Purpose. Development of a quantitative measure of the contribution of emergency scenarios to the overall uncertainty of the risk of man-made emergencies at fuel and energy facilities, based on the entropy of the system, the informational significance of individual scenarios and the degree of effectiveness of protective measures. This will allow for the consideration of low-probability but high-informational scenarios and ensure a rational choice of measures within a limited budget.

Methods. The primary method utilizes an information-entropy approach, allowing for a quantitative assessment of the contribution of each emergency scenario to the overall uncertainty of the system. An optimization model for selecting protective measures is constructed, taking into account their effectiveness, cost, and the informational significance of the scenarios. A numerical experiment is conducted to evaluate the effectiveness of the proposed approach under conditions of limited budgets and multiple risks.

Findings. The study's results demonstrated that using the informational significance of scenarios enables the development of more effective resource allocation strategies. The proposed model reduces residual risk at a lower cost compared to classical approaches. A numerical experiment confirmed the method's applicability for the informed selection of protective measures under conditions of high uncertainty and limited budgets for preventing man-made emergencies.

Application field of research. The developed model can be applied to risk management systems at industrial and infrastructure facilities exposed to man-made emergencies. The approach is relevant for designing civil defense action plans, justifying safety investments, and developing digital decision support platforms in resource-constrained environments with high uncertainty.

Keywords: safety, emergency situations, risk management, entropy analysis, risk assessment, man-made disasters, uncertainty analysis, accident prevention.

(The date of submitting: July 15, 2025)

REFERENCES

1. Rybakov A.V., Yanyshchik P.A. Razrabotka metodiki po obosnovaniyu perechnya meropriyatiy po snizheniyu ushcherba ot vozmozhnykh avariyn na neftepererabatyvayushchikh ob'ektakh [The development of the methodology for substantiating a list of measures to reduce damage from possible accidents at oil refineries]. *Technosphere Safety*, 2025. No. 1 (46). Pp. 153–164. (rus). EDN: XBESOM.
2. Fedorets A. Current concept of risk: the higher the probability of an event, the lower the risk. *Reliability: Theory & Applications*, 2024. Vol. 19. Special Issue № 6 (81). Part I. Pp. 88–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/current-concept-of-risk-the-higher-the-probability-of-an-event-the-lower-the-risk> (date of access: 06.06.2025).
3. Jo H.-H., Ko Y.-L. Large variance and fat tail of damage by natural disaster. *Proc. of the 2nd International conference on vulnerability and risk analysis and management (ICVRAM 2014) and the 6th International symposium on uncertainty modeling and analysis (ISUMA 2014) «Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Analysis, Modeling, and Management»*, Liverpool, United Kingdom, July 13–16, 2014. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014. Pp. 2744–2752. DOI: 10.1061/9780784413609.277
4. Chen W., Zou S., Qiu C., Dai J., Zhang M. Invulnerability analysis of nuclear accidents emergency response organization network based on complex network. *Nuclear Engineering and Technology*, 2024. Vol. 56, No. 8. Pp. 2923–2936. DOI: 10.1016/j.net.2024.02.053.
5. Weitzman M.L. Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 2011. Vol. 5, No. 2. Pp. 275–292. DOI: 10.1093/ reep/ rer006.
6. Kretsu R.M., Rybakov A.V. Entropiynnyy analiz chrezvychaynykh situatsiy tekhnogennogo kha-raktera: metodologiya i prakticheskoe primenenie [Entropy analysis of technogenic emergencies: methodology and practical application]. *Journal of Civil Protection*, 2024. Vol. 8, No. 4. Pp. 451–461. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2024.8-4.451. EDN: YGDFUJ.
7. ISO 31000:2009. Risk management – Principles and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization, 2009. 24 p.

Copyright © 2025 Kretsu R.M., Rybakov A.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.