

## ЭНТРОПИЙНЫЙ АНАЛИЗ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА: МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Крецу Р.М., Рыбаков А.В.

*Цель.* Данное исследование направлено на разработку и апробацию методики энтропийного анализа для оценки и прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера. В рамках работы рассматриваются теоретические основы энтропийного анализа, а также определяется ряд ключевых параметров и показателей, применяемых в данном методе. Одной из задач является проведение сравнительного анализа с традиционными методами оценки рисков и выявление преимуществ предложенной методики.

*Методы.* В исследовании использованы системный анализ, энтропийный подход к оценке рисков, вероятностно-частотный анализ, а также методы моделирования и прогнозирования. Энтропийный анализ, основанный на концепции измерения неопределенности и хаоса в сложных системах, позволяет более точно оценивать вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций и прогнозировать их развитие.

*Результаты.* Исследование демонстрирует, что энтропийный подход обладает рядом преимуществ перед традиционными методами, такими как большая гибкость и возможность учета множества различных факторов риска. Этот метод позволяет глубже понять механизмы возникновения техногенных катастроф и значительно повысить эффективность мероприятий по их предотвращению и ликвидации. В статье также представлены результаты применения методики на примере аварии на ТЭЦ-3 в Норильске, что подчеркивает ее практическую значимость.

*Область применения исследований.* Прогнозирование и предотвращение техногенных катастроф в различных отраслях промышленности, включая энергетику, транспорт и промышленное производство, является важной задачей, решаемой на основе полученных данных. Эти данные могут использоваться для оптимизации управления рисками, повышения безопасности и устойчивости техногенных систем, а также для разработки стандартных методик и обучения специалистов. Научно-практическая значимость исследования заключается в создании эффективного инструмента для оценки и управления рисками в условиях высокой неопределенности и сложности современных техногенных систем. Область применения результатов подчеркивает важность исследования для различных отраслей промышленности.

*Ключевые слова:* риск-менеджмент, энтропийный анализ, оценка рисков, техногенные катастрофы, методы моделирования, анализ неопределенности, управление кризисами, энергетическая безопасность, предупреждение аварий.

(Поступила в редакцию 1 октября 2024 г.)

### Введение

Современное общество сталкивается с растущей сложностью и взаимосвязанностью техногенных систем, что значительно увеличивает вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера. Такие ситуации могут привести к серьезным последствиям, включая человеческие жертвы, значительный материальный ущерб и долгосрочные экологические проблемы. В условиях активного развития промышленности, транспорта и энергетики вопрос обеспечения безопасности и устойчивости этих систем становится все более актуальным. Эффективное управление рисками ЧС требует современных подходов к их оценке и прогнозированию, что обуславливает необходимость поиска и применения новых методов анализа.

Энтропийный анализ представляет собой метод оценки и прогнозирования ЧС, основанный на концепции энтропии – меры неопределенности и хаоса в системе. Применение

энтропийного подхода позволяет более точно оценивать вероятность возникновения ЧС, выявлять ключевые факторы риска и прогнозировать развитие событий в условиях неопределенности. В отличие от традиционных методов энтропийный анализ предоставляет возможность комплексного и многопараметрического анализа сложных систем, что особенно важно в контексте техногенных катастроф. Это делает его ценным инструментом для разработки стратегий по предотвращению и ликвидации ЧС.

Целью данной статьи является разработка и апробация методики энтропийного анализа для оценки и прогнозирования ЧС техногенного характера. Для достижения этой цели в статье ставятся следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы энтропийного анализа и его применение в практике.
2. Определить основные параметры и показатели, используемые в энтропийном анализе ЧС.
3. Провести сравнительный анализ результатов энтропийного анализа с традиционными методами оценки рисков и определить его преимущества и недостатки.
4. Оценить практическую значимость предложенной методики для прогнозирования и предотвращения ЧС техногенного характера.

Предлагаемый подход позволит не только улучшить понимание механизмов возникновения и развития техногенных катастроф, но и повысить эффективность мероприятий по их предотвращению и ликвидации.

### **Основная часть**

**Теоретические основы энтропийного анализа.** Понятие энтропии является фундаментальным понятием в теории информации и термодинамике, отражающим меру неопределенности или беспорядка в системе. В контексте системного анализа энтропия используется для оценки сложности и устойчивости различных процессов и систем. Она помогает количественно оценить степень хаотичности и определить, насколько система подвержена изменениям или разрушениям. Применительно к анализу ЧС техногенного характера энтропия позволяет оценить вероятность возникновения различных событий и степень их влияния на систему в целом.

Энтропийный подход находит широкое применение в самых различных областях знаний. В экологии [1] он используется для оценки биоразнообразия и устойчивости экосистем. В экономике [2] – для анализа рыночных процессов и прогнозирования экономических кризисов. В информатике [3] и теории связи энтропия служит для оценки эффективности кодирования и передачи данных. В области управления рисками и анализа ЧС техногенного характера энтропия помогает оценить вероятность возникновения аварий и их потенциальные последствия, что способствует разработке более эффективных стратегий предотвращения и ликвидации ЧС. В таблице 1 представлен сравнительный анализ двух подходов к оценке рисков ЧС техногенного характера: энтропийного подхода и вероятностно-частотной оценки рисков.

С точки зрения методологии энтропийный подход предлагает иной взгляд на оценку рисков, измеряя неопределенность в информационных потоках, в то время как вероятностно-частотная оценка ориентирована на анализ прошлых данных и вероятностей событий:

- энтропийный подход: оценка рисков основана на использовании теории информации, которая позволяет измерять степень неопределенности и неожиданности событий;
- вероятностно-частотная оценка рисков: основана на частоте и вероятности возникновения событий, с учетом исторических данных и статистики.

С позиции практического применения энтропийный подход может быть полезным там, где данных недостаточно для традиционной статистической оценки, а вероятностно-частотная оценка лучше подходит для анализа рисков на основе исторических данных, например, для анализа сценариев с низкой вероятностью возникновения и критическим уровнем ущерба для общества, государства и окружающей среды, выделим эту группу рисков

в рамках термина «критические риски» производственного предприятия. Иначе говоря, энтропийный подход имеет преимущество в оценке рисков при отсутствии полной информации при анализе критических рисков, тогда как вероятностно-частотная оценка более надежна в стабильных и предсказуемых условиях, но можно недооценивать новые и неожиданные риски, особенно в условиях быстро изменяющейся производственной среды. Однако энтропийная оценка может быть сложна для интерпретации и принятия решений из-за отсутствия теоретических и методических основ.

**Таблица 1. – Сравнение методов оценки рисков ЧС: энтропийный подход и вероятностно-частотная оценка**

Аспект	Энтропийный подход	Вероятностно-частотная оценка
Виды рисков	Включает несколько видов рисков (экологические, техногенные и т.д.)	В основном сосредоточена на физических и социальных рисках
Оценка вероятности	Процесс оценки вероятности исходов более сложен, требует детализации параметров	Оценка вероятности часто базируется на исторических данных и статистике
Учет последствий	При учете последствий учитывается их разнообразие и степень влияния на окружающую среду	Последствия оцениваются в контексте их частоты и влияния на социальные структуры
Гибкость и адаптация	Оценка рисков может требовать дополнительной настройки и адаптации методов	Включает множество случайных событий
Преимущества	Модель хорошо адаптирована для сложных ситуаций	Метод позволяет получать адекватные оценки в условиях малой вариабельности
Ограничения	Трудно учитывать абсолютно все факторы	Оценка технологических и экономических рисков, связанных с ЧС

В энтропийном анализе рисков ЧС категория «критический риск» играет ключевую роль, определяя наиболее разрушительные сценарии для системы. Оценка результативности защитных мер становится необходимой для минимизации этих рисков. Информационная значимость в данном контексте выступает как количественная мера, показывающая вклад каждой защитной меры в снижение общей неопределенности и повышение устойчивости системы к ЧС. Анализ информационной значимости позволяет выявить наиболее критические риски и эффективные методы их управления, обеспечивая адекватное распределение ресурсов и максимальную защиту системы. Таким образом, энтропийный анализ рисков ЧС, используя информационную значимость, способствует более точной и обоснованной оценке эффективности защитных мер и повышению уровня готовности к потенциальным угрозам.

Защитные меры условно можно представить в рамках пяти категорий с оценкой результативности защитных мер и остаточной вероятностью реализации опасности<sup>1</sup>. В таблице 2 защитные меры классифицируются по категориям, которые отражают различные уровни и типы вмешательств для минимизации рисков и ущерба в случае техногенных аварий. Каждая категория имеет свои особенности и предполагает определенные меры, направленные на снижение вероятности и/или ущерба от ЧС:

*I категория:* исключение опасности – меры направлены на полное исключение опасного объекта или ситуации либо на снижение уровня опасного фактора до безопасного уровня;

*II категория:* конструктивные меры – меры, исключающие возможность реализации опасного фактора, учитывающие или не учитывающие возможность умышленных действий работников, третьих лиц;

*III категория:* информационные меры – включают использование ограждающих, предупреждающих или сигнальных средств;

*IV категория:* организационные меры – обучение и проверка владения безопасными методами работы, выполнение работ по наряду-допуску;

<sup>1</sup> Методы оценки и расчета профессиональных рисков работников железнодорожного транспорта: ГОСТ Р 12.0.011–2017. – Введ. 22.12.2017. – М.: Стандартинформ, 2018. – 39 с.

*V категория:* реагирующие меры – применение мер реагирования на факторы/опасности ЧС, реагирование по планам ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов (ПЛАРН), планам ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС), применение средств индивидуальной защиты (СИЗ) и др.

Таблица 2. – Категории результативностей защитных мер

Категория	Защитная мера	Результативность защитной меры с учетом контроля	Остаточная вероятность реализации опасности, $P$
I	Исключение опасности (опасного объекта, ситуации или действия)	1,0	0
	Снижение уровня опасного фактора в источнике опасности до безопасного уровня	0,9–1,0	0–0,1
	Применение конструктивных мер, исключающих возможность реализации опасного фактора (включая возможность умышленных действий работника по преодолению защитной меры)	0,8–0,9	0,1–0,2
II	Применение конструктивных мер, исключающих возможность реализации опасного фактора (исключая возможность умышленных действий работника по преодолению защитной меры)	0,7–0,8	0,2–0,3
III	Применение ограждающих, предупреждающих (запрещающих) информационных или сигнальных средств	0,6–0,7	0,3–0,4
IV	Обучение и проверка владения работниками безопасными методами и приемами выполнения работ	0,5–0,6	0,4–0,5
	Выполнение работ по наряду-допуску	0,3–0,5	0,5–0,6
	Организационные меры: инструктаж, контроль, страховка	0,2–0,3	0,7–0,8
V	Применение мер реагирования: улавливающие сетки (от падения), применение СИЗ, планы ликвидации ЧС (ПЛАРН, ПЛАС и др.)	0,1–0,2	0,8–0,9
	Организация оказания первой помощи	0,1	0,9

Результативность защитных мер напрямую зависит от наличия систематического контроля за их состоянием и функционированием. При отсутствии такого контроля результативность каждой меры из таблицы 2 уменьшается в два раза. Это связано с тем, что без постоянного мониторинга и корректирующих действий невозможно своевременно выявлять отклонения в работе системы, что снижает общую результативность защитных мер. Важно также учитывать, что средства и методы контроля могут изменяться по мере появления новых предложений на рынке, и предприятиям необходимо регулярно мониторить и оценивать их, чтобы поддерживать актуальные и наиболее эффективные решения для каждой категории защитных мер. Результативность измеряется по шкале от 0 до 1, где более высокие значения означают более результативные меры.

Остаточная вероятность  $P$  – это вероятность реализации опасности после применения защитных мер. Она зависит от категории и типа защитной меры.

**Применение метода к анализу аварии на ТЭЦ-3 АО «НТЭК».** 29 мая 2020 г. в районе Кайеркан г. Норильска на ТЭЦ-3 АО «НТЭК» произошла разгерметизация резервуара хранения дизельного топлива, в результате которой 21,2 тыс. т топлива вытекли из резервуара, вышли за пределы обвалования, попали в котлован, на прилегающую территорию и в ручей Безымянный. Впоследствии через ручей Безымянный и р. Далдыкан разлив топлива достиг р. Амбарная, где были установлены защитные боновые ограждения. По иску Росприроднадзора суд взыскал с предприятия рекордные 146 млрд рублей. Применим методику энтропийно-информационного анализа данной аварии [4; 5].

В рамках данного исследования был произведен сбор данных из отчета о расследовании причин аварии на ТЭЦ-3. Основные выявленные факторы включают технические причины аварии, такие как разрушение свайного основания резервуара, организационные недостатки, выражающиеся в недостаточном контроле и проектных ошибках, а также влияние климатических условий, в частности, аномально высоких температур.

Следующим этапом является определение начальной энтропии системы, которая может быть выражена через вероятности различных отказов и их последствий. В контексте рассматриваемой аварии на ТЭЦ-3 ключевым событием, влияющим на энтропию системы, является разрушение свайного основания резервуара и последующий разлив дизельного топлива. Данный отказ служит исходной точкой для анализа, поскольку имеет наиболее серьезные последствия для системы. Начальная энтропия системы, таким образом, определяется как мера неопределенности, связанной с данным отказом.

$$H(X) = -\sum p(X) \log_2 p(X), \quad (1)$$

где  $p(X)$  – вероятность различных состояний  $X$  системы:

вероятность разрушения резервуара (исходя из данных)  $p(\text{разрушение}) = 0,00015$ ;

вероятность нормального состояния резервуара  $p(\text{норма}) = 1 - p(\text{разрушение}) = 0,99985$ ;

$$H(\text{начальная}) = -(0,00015 \log_2 0,00015 + 0,99985 \log_2 0,99985) \approx 0,00212.$$

Далее была проведена оценка информационного вклада предложенных в отчете мер. На основании отчета о расследовании аварии были предложены различные меры, направленные на снижение риска повторения подобных событий. Каждая из этих мер имеет определенный информационный вклад, способствующий снижению неопределенности в системе. В качестве примера можно рассмотреть следующие мероприятия:

– проведение регулярных обследований фундаментов резервуаров: эта мера позволяет своевременно выявлять потенциальные угрозы для целостности резервуаров, что значительно снижает вероятность возникновения критических отказов;

– установка системы мониторинга состояния многолетнемерзлых пород: введение данной системы позволяет контролировать изменения в состоянии грунта, что важно для оценки влияния климатических условий на устойчивость фундаментов;

– введение системы управления целостностью первичной защитной оболочки резервуаров: данная мера обеспечивает постоянный контроль за состоянием защитной оболочки, что позволяет оперативно устранять выявленные дефекты.

На основании собранных данных был выполнен расчет изменения энтропии для каждой из предложенных мер. Например, установка системы мониторинга многолетнемерзлых пород существенно снижает неопределенность, связанную с воздействием климатических условий (изменений климатических условий) на фундамент резервуара, тем самым уменьшая энтропию системы и снижая вероятность возникновения аварии. Предположим, что установка системы мониторинга снижает вероятность разрушения резервуара до величины  $p'(\text{разрушение}) = 0,00005$ , тогда

$$H(\text{система мониторинга}) = -(0,00005 \log_2 0,00005 + 0,99995 \log_2 0,99995) \approx 0,00079,$$

а изменение энтропии будет равно

$$\Delta H = H(\text{начальная}) - H(\text{система мониторинга}) \approx 0,00212 - 0,00079 = 0,00133.$$

Результаты расчетов изменения энтропии позволили определить наиболее результативные и эффективные меры, которые могут быть приняты для минимизации риска повторения аварии. В данном случае наиболее целесообразными решениями являются установка систем мониторинга и проведение регулярных обследований, которые значительно уменьшают неопределенность и способствуют повышению безопасности эксплуатации резервуаров на ТЭЦ-3 АО «НТЭК».

Таким образом, установка системы мониторинга снижает энтропию на 0,00133, что соответствует значительному уменьшению неопределенности и рисков, связанных с разрушением резервуара.

**Понятие информационной значимости.** Информационная значимость позволяет определить, какие факторы оказывают наибольшее влияние на вероятность аварии после введения мер. В данном контексте информационная значимость может служить руководством для приоритизации действий по снижению рисков.

*Высокая значимость:* указывает на критические факторы, требующие первоочередного внимания. Например, несмотря на снижение вероятности, фактор  $X_1$  (несущая способность свай) все еще имеет высокую значимость, что может потребовать дальнейших исследований и технических решений.

*Средняя и низкая значимость:* факторы с такой значимостью указывают на зоны, где меры уже дали результаты, но поддержка и контроль все равно необходимы.

В зависимости от детализированного состава системы мониторинга и отнесения ее к определенной категории мер защиты (табл. 2) вероятность разрушения дополнительно может быть снижена за счет выбора более результативной меры.

Для создания математической модели аварии на ТЭЦ-3 АО «НТЭК» сначала кратко определим **ключевые факторы и риски**.

*Событие:* разгерметизация резервуара хранения дизельного топлива, в результате чего разлилось 212 тыс. т топлива. Часть топлива попала в грунт и водные объекты. Были установлены боновые заграждения, чтобы предотвратить дальнейшее распространение загрязнения.

*Причины аварии:*

1) технические:

– недостаточная несущая способность плитного ростверка основания и железобетонных свай;

– разрушение свай-стоек и монолитного основания, просадка под днищем резервуара;

2) организационные:

– недостатки в проектировании и строительстве, а именно неправильные эксцентриситеты, отсутствие поперечной арматуры, неполное заглубление свай;

– некачественный контроль за эксплуатацией сооружений;

3) климатические: влияние изменения климата на многолетнемерзлые породы, приведшее к проседанию свай.

– проседание свай.

**Построение математической модели.** Для анализа аварии воспользуемся методом энтропийно-информационного анализа:

1) *элементы системы:*

$X_1$  – несущая способность свайного основания;

$X_2$  – уровень проектирования и строительных работ;

$X_3$  – условия эксплуатации и мониторинга;

$X_4$  – климатические условия;

2) *вероятностные характеристики:*

$P(X_1)$  – вероятность разрушения свайного основания;

$P(X_2)$  – вероятность дефектов в проектировании;

$P(X_3)$  – вероятность отсутствия надлежащего контроля;

$P(X_4)$  – вероятность изменения климатических условий, влияющих на прочность;

3) *модель риска:* используем модель, в которой общая вероятность аварии  $P(A)$  выражается через вероятности событий:

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(X_i)), \quad (2)$$

где  $n = 4$  – количество факторов критического риска.

Для примера расчета зададим вероятности на основе данных расследования:

$P(X_1) = 0,7$  – высокая вероятность из-за недостаточной несущей способности;

$P(X_2) = 0,6$  – вероятность дефектов, выявленных в процессе анализа проектных решений;

$P(X_3) = 0,5$  – вероятность недостаточного мониторинга;

$P(X_4) = 0,4$  – вероятность влияния климатических условий.

Тогда вероятность аварии:

$$P(A) = 1 - (1 - 0,7)(1 - 0,6)(1 - 0,5)(1 - 0,4);$$

$$P(A) = 1 - 0,3 \cdot 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,6 = 1 - 0,036 = 0,964.$$

Вероятность аварии составляет 96,4 %, что подтверждает высокий риск инцидента при данных условиях.

Таблица 3. – Защитные меры

Категория	Мера	Описание
Технические меры	Усиление свайного основания	Установка дополнительных свай и усиление существующих конструкций
	Антикоррозийные покрытия	Использование материалов, устойчивых к климатическим изменениям
Организационные меры	Повышение квалификации персонала	Обучение сотрудников для лучшего понимания рисков и их предотвращения
	Регулярные проверки	Внедрение систематических инспекций и аудитов для оценки состояния объектов
Климатические меры	Мониторинг температуры грунта	Установка датчиков для контроля температуры и состояния мерзлоты
	Исследование климатических изменений	Оценка влияния климатических факторов на состояние сооружений
Системы безопасности	Боновые ограждения	Установка дополнительных барьеров для предотвращения распространения разливов
	План ликвидации аварий	Разработка и проведение учений по реагированию на аварийные ситуации

Обновим модель и расчеты с учетом результативности из таблицы, представленной в приложенном документе, нужно связать вероятности каждого фактора с результативностью мер, которые были предприняты для снижения этих вероятностей. В результате модель будет учитывать не только исходные вероятности факторов, но и эффективность применяемых мер.

**Обновленная модель с учетом результативности, основные параметры и предположения:**

1. Факторы риска  $X_i$ :

$X_1$  – несущая способность свайного основания;

$X_2$  – уровень проектирования и строительных работ;

$X_3$  – условия эксплуатации и мониторинга;

$X_4$  – климатические условия.

2. Исходные вероятности  $P_0(X_i)$ , полученные на основе начальных оценок вероятностей возникновения каждого фактора без учета мер.

3. Результативность мер  $R(X_i)$  – коэффициенты, отражающие степень снижения риска после применения мер.

4. Скорректированные вероятности  $P(X_i)$ , учитывающие эффективность применяемых мер:

$$P(X_i) = P_0(X_i)(1 - R(X_i)). \quad (3)$$

5. Энтропия  $H(X_i)$ :

$$H(X_i) = -P(X_i) \log_2 P(X_i) - (1 - P(X_i)) \log_2 (1 - P(X_i)). \quad (4)$$

6. Информационная значимость  $I(X_i)$ :

$$I(X_i) = \frac{H(X_i)}{\sum_{j=1}^n H(X_j)}. \quad (5)$$

7. Общая вероятность аварии  $P(A)$ , вычисляемая по формуле (2).

**Применение таблицы результативности и обновленный расчет энтропии и значимости.** Предположим, что у нас есть следующая информация о результативности защитных мер для каждого фактора:

$R(X_1) = 0,4$  – снижение риска благодаря улучшению качества свайного основания;

$R(X_2) = 0,5$  – результативность улучшенных проектных решений;

$R(X_3) = 0,6$  – улучшение мониторинга и эксплуатационных условий;

$R(X_4) = 0,3$  – адаптация к климатическим изменениям.

*Пересчет вероятностей.* На основе предположений и результативности обновим вероятности:

$$P_0(X_1) = 0,7; \quad P(X_1) = 0,7(1 - 0,4) = 0,42.$$

$$P_0(X_2) = 0,6; \quad P(X_2) = 0,6(1 - 0,5) = 0,3.$$

$$P_0(X_3) = 0,5; \quad P(X_3) = 0,5(1 - 0,6) = 0,2.$$

$$P_0(X_4) = 0,4; \quad P(X_4) = 0,4(1 - 0,3) = 0,28.$$

*Энтропия:*

$$H(X_1) = -0,42 \log_2 0,42 - 0,58 \log_2 0,58 \approx 0,981;$$

$$H(X_2) = -0,3 \log_2 0,3 - 0,7 \log_2 0,7 \approx 0,881;$$

$$H(X_3) = -0,2 \log_2 0,2 - 0,8 \log_2 0,8 \approx 0,722;$$

$$H(X_4) = -0,28 \log_2 0,28 - 0,72 \log_2 0,72 \approx 0,855.$$

Общая энтропия:

$$\sum_{j=1}^4 H(X_j) = 0,981 + 0,881 + 0,722 + 0,855 = 3,439;$$

*Информационная значимость:*

$$I(X_1) = 0,981/3,439 \approx 0,285; \quad I(X_3) = 0,722/3,439 \approx 0,210;$$

$$I(X_2) = 0,881/3,439 \approx 0,256; \quad I(X_4) = 0,981/3,439 \approx 0,249.$$

*Общая вероятность аварии:*

$$P(A) = 1 - (1 - 0,42)(1 - 0,3)(1 - 0,2)(1 - 0,28) \approx 0,766.$$

### Анализ результатов

Вероятность аварии  $P(A) = 0,766$ : снижение вероятности до 76,6 % указывает на уменьшение риска благодаря предпринятым мерам. Однако необходимо дальнейшее совершенствование защитных мер: повышение их результативности в целях снижения вероятности повторения аварийной ситуации.

*Информационная значимость*

$I(X_1) = 0,285$ : увеличенная значимость несущей способности свай показывает необходимость дальнейшего контроля и модернизации.

$I(X_2) = 0,256$ : значительное влияние проектирования подчеркивает важность качественного подхода к строительным работам.

$I(X_3) = 0,210$ : улучшения в мониторинге и эксплуатации заметно снижают риск, однако остается возможность для дальнейших улучшений.

$I(X_4) = 0,249$ : климатические условия продолжают оказывать значительное влияние, несмотря на принятые меры адаптации.



### Применение модели

1. Анализ результативности мер: постоянная оценка результативности текущих мер и их корректировка на основе новых данных.

2. Целенаправленное распределение ресурсов: направление усилий и инвестиций в наиболее значимые области для снижения вероятности аварии.

3. Разработка стратегий адаптации: прогнозирование и подготовка к изменениям внешних условий, таких как климатические изменения, с учетом их влияния на эксплуатацию.

Таким образом, представленная модель с учетом результативности мер позволяет глубже понять структуру рисков и их динамику, а также улучшить процесс принятия решений в управлении безопасностью на промышленных объектах.

### Заключение

Энтропийно-информационный анализ позволяет количественно оценить результативность различных мер по снижению риска, что помогает принимать обоснованные решения для улучшения безопасности и надежности систем. Применение этого метода к анализу аварий, как в случае с ТЭЦ-3, позволяет выявить наиболее значимые факторы риска и разработать эффективные меры по их снижению.

Таким образом, энтропийный анализ рисков ЧС является перспективным и эффективным подходом, который при надлежащем внедрении может существенно повысить уровень производственной безопасности предприятий и устойчивости техногенных систем за счет значительного снижения вероятности аварий на основе оценки результативности защитных мер, снижения неопределенности в системе производственной безопасности на основе оценки энтропии системы и оценки вклада каждой защитной меры в уменьшение неопределенности системы на основе оценки информационной значимости, особенно в контексте управления критическими рисками производственных процессов и производств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Vranken, I. A review on the use of entropy in landscape ecology: heterogeneity, unpredictability, scale dependence and their links with thermodynamics / I. Vranken, J. Baudry, M. Aubinet [et al.] // *Landscape Ecology*. – 2015. – Vol. 30. – P. 51–65. – DOI: 10.1007/s10980-014-0105-0.
2. Olbryś, J. Entropy-Based Applications in Economics, Finance, and Management / J. Olbryś // *Entropy*. – 2022. – Vol. 24, № 10. – Article 1468. – 3 p. – DOI: 10.3390/e24101468.
3. Cruces, S. Information Theory Applications in Signal Processing / S. Cruces, R. Martín-Clemente, W. Samek // *Entropy*. – 2019. – Vol. 21, № 7. – Article 653. – 4 p. – DOI: 10.3390/e21070653.
4. Белая книга о ликвидации последствий аварии на ТЭЦ-3 АО «НТЭК» и мерах, принятых компанией // Группа компаний «Норникель». – М.: Норникель, 2021. – 98 с. – URL: <https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/white-paper-2020.pdf> (дата обращения: 20.09.2024).
5. Наш Крайний Север: отчет об устойчивом развитии Группы компаний «Норникель» за 2020 год // Группа компаний «Норникель». – М.: Норникель, 2020. – 250 с. – URL: [https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/disclosure/NN\\_CSO2020\\_RUS\\_28.04.pdf](https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/disclosure/NN_CSO2020_RUS_28.04.pdf) (дата обращения: 20.09.2024).

**Энтропийный анализ чрезвычайных ситуаций техногенного характера:  
методология и практическое применение**

**Entropy analysis of technogenic emergencies: methodology and practical application**

***Крецу Ромина Маратовна***

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный социальный университет», факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, кафедры 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, кафедры 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

## ENTROPY ANALYSIS OF TECHNOGENIC EMERGENCIES: METHODOLOGY AND PRACTICAL APPLICATION

Kretsu R.M., Rybakov A.V.

*Purpose.* This research aims to develop and test a methodology for entropy analysis to assess and predict technogenic emergencies. The study examines the theoretical foundations of entropy analysis, and identifies a set of key parameters and indicators used in this method. One of the objectives is to conduct a comparative analysis with traditional risk assessment methods and highlight the advantages of the proposed methodology.

*Methods.* The study employs systems analysis, entropy-based risk assessment, probabilistic-frequency analysis, and modeling and forecasting methods. Entropy analysis, based on the concept of measuring uncertainty and chaos in complex systems, allows for more accurate assessment of the likelihood of emergencies and prediction of their development.

*Findings.* The research demonstrates that the entropy approach has several advantages over traditional methods, such as greater flexibility and the ability to consider a wide range of risk factors. This method provides a deeper understanding of the mechanisms of technogenic disasters and significantly enhances the effectiveness of measures for their prevention and mitigation. The article also presents the results of applying the methodology to the case of the accident at Norilsk TPP-3, highlighting its practical significance.

*Application field of research.* The prediction and prevention of technogenic disasters in various industries, including energy, transport, and industrial production, is an important task that can be solved using the obtained data. This data can be used to optimize risk management, improve the safety and resilience of technogenic systems, as well as to develop standard methodologies and train specialists. The scientific and practical significance of the research lies in the creation of an effective tool for risk assessment and management under conditions of high uncertainty and complexity of modern technogenic systems. The application scope of the results emphasizes the importance of this research for various industries.

*Keywords:* risk management, entropy analysis, risk assessment, technogenic disasters, modeling methods, uncertainty analysis, crisis management, energy safety, accident prevention.

(The date of submitting: October 1, 2024)

### REFERENCES

1. Vranken I., Baudry J., Aubinet M., Visser M., Bogaert J. A review on the use of entropy in landscape ecology: heterogeneity, unpredictability, scale dependence and their links with thermodynamics. *Landscape Ecology*, 2015. Vol. 30. P. 51–65. DOI: 10.1007/s10980-014-0105-0.
2. Olbryś J. Entropy-Based Applications in Economics, Finance, and Management. *Entropy*, 2022. Vol. 24, No. 10. Article 1468. 3 p. DOI: 10.3390/e24101468.
3. Cruces S., Martín-Clemente R., Samek W. Information Theory Applications in Signal Processing. *Entropy*, 2019. Vol. 21, No. 7. Article 653. 4 p. DOI: 10.3390/e21070653.
4. *Belaya kniga o likvidatsii posledstviy avarii na TETs-3 AO «NTEK» i merakh, prinyatykh kompaniey* [White Paper on liquidation of the consequences of the accident at TPP-3 of JSC Norilsk-Taimyr Energy Company and measures taken by the Norinickel Group]. Moscow: Norinickel Group, 2021. 98 p. URL: <https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/white-paper-2020.pdf> (date of access: September 20, 2024). (rus)
5. *Nash Krayniy Sever: otchet ob ustoychivom razvitii Gruppy kompaniy «Nornikel'» za 2020 god* [Our Far North: Norinickel Group Sustainability Report 2020]. Moscow: Norinickel Group, 2020. 250 p. URL: [https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/disclosure/NN\\_CSO2020\\_RUS\\_28.04.pdf](https://www.nornickel.ru/files/ru/investors/disclosure/NN_CSO2020_RUS_28.04.pdf) (date of access: September 20, 2024). (rus)

Copyright © 2024 Kretsu R.M., Rybakov A.V.

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