

УДК 004.413.4:614.8.026.1

## Специфика анализа и оценок показателей риска редких событий на опасных производственных объектах

А.В. Бочков<sup>1\*</sup>, В.С. Сафонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром газнадзор», Российская Федерация, 117418, г. Москва, Новочерёмушкинская ул., д. 65

<sup>2</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

\* E-mail: a.bochkov@gmail.com

### Ключевые слова:

редкие события, синтез риска, неопределенность, функция выбора, Парето-оптимальное множество, ранжирование.

**Тезисы.** Оценка риска редких событий является одной из ключевых задач, решаемых аналитиками при обеспечении безопасного функционирования опасных производственных объектов. Трудности, возникающие при этом, принято списывать на неопределенность факторов, влияющих на принятие решений. Как правило, применяются различные вариации байесового подхода. Особый упор делается на случай, когда неопределенность не имеет классического статистического характера и может быть охарактеризована лишь субъективными соображениями лиц, принимающих решения, и их экспертов. По сути, байесов подход и сегодня остается единственным завершённым подходом к проблеме принятия решений в условиях неопределенности. Многие авторы достаточно убедительно критикуют его, однако до настоящего времени не найдено каких-либо вразумительных альтернатив. В статье предложена логика выбора, отличающаяся от общепринятой. Приведен подход к построению функционала интегрального риска редких событий на опасных производственных объектах, и в общем виде описан алгоритм выбора наиболее значимых из них с системной точки зрения, учитывающий их разнотипность.

Единая система газоснабжения (ЕСГ), относящаяся к классу так называемых больших систем, как подсистема входит в состав топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России [1, 2]. К подобным системам относят сложные, находящиеся в процессе непрерывного изменения иерархически построенные человеко-машинные системы, в которых пространственный фактор играет большую роль. Характерной особенностью таких систем является неполная (неоднозначная) информация управляющих ими органов и лиц (ЛПР), принимающих решения о системе. Как на подсистему ТЭК на развитие ЕСГ оказывают влияние закономерности, характерные для развития энергетики России в целом. Важная особенность с точки зрения структуры – большое число внешних и внутренних связей, поэтому, рассуждая о рисках редких событий на объектах (особенно опасных производственных объектах) ЕСГ, следует помнить, что эти объекты являются, как правило, элементами сложной неизолированной системы. Обеспечение требуемого уровня безопасности таких объектов диктует необходимость комплекса организационных, оперативных, режимных, инженерно-технических, пожарно-профилактических мероприятий и действий физических лиц (сотрудников охраны, администрации, органов внутренних дел и др.), направленных на предотвращение ущерба интересам эксплуатирующей объект организации, ее персоналу и третьим лицам [3, 4].

Редкие события представляют собой дискретные события, статистически «невероятные» в том смысле, что они очень редко наблюдаются. Несмотря на статистическую достоверность, такие события правдоподобны, поскольку исторические экземпляры события (или его аналога), как правило, задокументированы. Анализ редких событий часто фокусируется на так называемых «разумно ожидаемых» событиях, которые способны оказать существенное негативное влияние либо экономически, либо с точки зрения человеческих жертв. Для их анализа применяются вероятностные методы моделирования аварийных процессов и событий [5, 6] и детерминистские методы [7]. Однако опыт использования сугубо вероятностного анализа (по сути – однокритериального инструмента) показал, что этот подход охватывает

не все необходимые аспекты обеспечения безопасности. Цель статьи – предложить формализованный единый подход и алгоритм оценки риска редких событий для больших совокупностей опасных производственных объектов вне зависимости от их технологических особенностей и условий функционирования.

### **Постановка задачи и выбор метода решения О проблемах выбора показателей риска редких событий**

В случае исследования рядов исторических данных редких событий мы имеем дело с дискретными динамическими вероятностными процессами, при рассмотрении которых некорректно агрегирование имеющихся данных, которое, по сути, является «подменой» сложных динамических информационных массивов, как правило, двумя-тремя обобщенными характеристиками: математическим ожиданием и дисперсией, на которую сильно влияют большие выбросы данных и, главное, типом распределения агрегированной суммы.

Математическое ожидание – один из худших показателей для использования в прогнозах (что очень наглядно доказывают азартные игры). Особенно плохи показатели среднего (средневзвешенного) значения [8], когда в исследуемой статистике имеются данные с большими выбросами [9]. Более устойчивыми и надежными являются медиана распределения случайной величины [10] или даже медиана множества, построенного из значений полусумм всех возможных пар из статистической выборки, например, так называемая статистика Ходжеса – Лемана [11].

Дисперсия (сумма квадратов отклонения от среднего), в свою очередь, – один из худших показателей для оценки размеров коридора изменения показателей прогнозируемого нестационарного процесса, особенно когда слагаемые, формирующие значение этого показателя, отличаются на несколько порядков. В этом случае размер коридора определяют только редко наблюдаемые слагаемые с большими значениями, а данные, формирующие размер коридора, сами в этот коридор не попадают. События, вызванные противоправными действиями, вообще уникальны. Поэтому применение принципов статистической молекулярной физики для динамического описания масштабов ущербов, потерь газа и частот аварий (квантующихся по размеру), как

правило, приводит к выводу о «случайности» анализируемых процессов, и в них не обнаруживаются какие-либо закономерности. Причем вывод о несоответствии модели и реальности делается по суммам разности квадратов между модельными и реальными данными – опять же по дисперсии невязок, т.е. происходит объяснение одной ошибки через другую.

Открытым и малоизученным остается вопрос о типах распределения показателей аварий, особенно аварий с тяжелыми последствиями. Из-за квантовой природы аварий использование аппарата анализа данных, основанного на классических законах больших чисел, является некорректным. Собственно, сходимость по вероятности в реальности практически никогда не наблюдается, за исключением статистики, накопленной в системах массового обслуживания [12]. Соответствие реальности теории в этих сферах деятельности достигается за счет очень большого количества реализаций. Смысл страхования, например, заключается в охвате деятельности большого числа лиц и превращении случайных убытков в постоянные издержки [13]. Качественная и, главное, продуктивная критика статистического анализа данных, содержащих большие выбросы значений, встречается во многих монографиях, например, ряд робастных методов статистической обработки содержится в ставшей уже классической работе Ф. Хампеля и др. [9]. Уменьшение горизонта планирования также ничего не дает: прежде чем проявится тенденция на повышение, в прогнозе будет не угадана значительная часть событий в начале реализации каждого паттерна.

Таким образом, необходим корректный первичный анализ многолетней статистики, в результате которого уже можно делать предположения, возможна ли разработка адекватного инструмента прогнозирования и какая доля случайности дат возникновения ситуаций, связанных с редкими событиями, и их масштабов может быть с его помощью устранена. Также очевидно, что, поскольку истинные законы распределения анализируемых случайных процессов и, главное, факторы их определяющие, будут непрерывно корректироваться (любая высокотехнологичная система меняется быстрее, чем накапливается адекватная статистика [14]), необходимо использовать критерии, «свободные от распределений». В частности, необходимо в качестве критериев достижения прогностической цели взять не величины

отклонений модельных и реальных данных, а критерии, используемые в методах классификации и распознавания образов.

Вообще, при построении модели состояния прогнозируемого объекта не стоит считать, что, зная частоты отказов элементов оборудования, можно получить оценку аварийных ситуаций того или иного типа и масштаба. Для малых инцидентов, которые достаточно часты, это вполне допустимо (что и демонстрирует теория надежности), для редких же событий такой подход в корне неверен. Для редкого события с вероятностью  $p < 0,01$  квадратичное отклонение  $\sigma = \sqrt{\frac{p}{K}}$ , где  $K$  – количество испытаний, выше на порядок, чем сама вероятность  $p$ . Таким образом, принимая утверждение аналитика, что «расчетная вероятность некоторого события равна 0,01», следует помнить, что на самом деле  $p = 0,01 \pm 0,1$ . Для утверждения, что  $p = 0,01 \pm 0,001$  необходимо, чтобы  $K$  было больше 10000, чего не наблюдается в действительности.

Таким образом, оценку риска для объектов сложной незамкнутой динамической системы, подобной ЕСГ, следует проводить, используя математический аппарат теории игр, а в более общей постановке – теории конфликтующих систем, которым до сих пор уделено очень мало внимания.

### О методе синтеза интегрального показателя рисков

Для оценки системной значимости объектов ЕСГ (а по сути – уровня угрозы, риска нештатной ситуации) предлагается использовать иерархическую многокритериальную модель [15]. Показано, что при этом сначала необходимо проанализировать «сырые» данные процесса, а затем синтезировать их в осмысленную структуру, объясняющую исследуемый процесс. Интегральный риск нештатной ситуации  $R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n)$ , являющийся результатом такого синтеза, представляет собой функцию рисков возникновения частных нештатных ситуаций  $r_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Вид зависимости нормированного интегрального риска  $R$  от своих аргументов выбирается исходя из условий  $0 \leq R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) \leq 1$ ;  $R(0, \dots, 0, \dots, 0) = 0$ ;  $R(0, \dots, r_i, \dots, 0) = r_i$  и  $0 \leq R(r_1, \dots, 1, \dots, r_n) = 1$  для  $\forall r_i = 1$  независимо от значений других аргументов.

Непрерывная функция  $R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n)$ , удовлетворяющая этим условиям, имеет следующий общий вид:

$$R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) = 1 - \left\{ \prod_{i=1}^n (1 - r_i) \right\} g(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n), \quad (1)$$

где  $g(0, \dots, r_i, \dots, 0) = 1$ .

Если в частном случае  $g(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) \equiv 1$ , то, соответственно,

$$R(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) = 1 - \left\{ \prod_{i=1}^n (1 - r_i) \right\}, \quad (2)$$

что дает заниженную оценку интегрального риска из расчета, что поток нештатных ситуаций представляет собой смесь ординарных событий, взятых из однородных, но различающихся значениями  $r_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) выборок.

Поскольку для реальных систем риски, как правило, зависимы, получаем

$$g(r_1, \dots, r_i, \dots, r_n) = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} [r_i]^{\alpha_{ij}} [r_j]^{\beta_{ij}}; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} \leq 1, C_{ij} \geq 0, \alpha_{ij} > 0, \beta_{ij} > 0, \quad (4)$$

где  $C_{ij}$  – коэффициенты связности рисков  $i$ -й и  $j$ -й нештатных ситуаций;  $\alpha_{ij}$  и  $\beta_{ij}$  – положительные коэффициенты эластичности замены соответствующих рисков.

Текущие значения рисков  $r_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), входящие в интегральный показатель (1), являются величинами, изменяемыми во времени с различными скоростями. Вследствие этого классический расчет сбалансированности рисков приводит к задачам комбинаторной сложности на исходных данных, имеющих объективно случайную, неопределенную, часто качественную природу. Решение задач анализа рисков осложняется еще и тем, что значительную роль могут сыграть так называемые слабо формализуемые угрозы, для которых характерно большое количество информации, которая имеет символическую природу, не существует математической постановки задачи и формального алгоритмического решения, а если и существует, то пространство поиска решения очень велико и найти его за допустимое время и с имеющимися ресурсами практически невозможно, а также требуются эвристики для решения задач, т.е. утверждения, основанные на экспериментальных данных, интуиции (цель их применения – найти более рациональное решение,

а не точное математическое, путем исключения заранее непригодных решений).

Для учета этих факторов предложено [15] формировать величины  $r_i$  как произведения четырех составляющих:

$$r_i = r_i^{(a)} r_i^{(b)} r_i^{(c)} r_i^{(d)}. \quad (5)$$

Первый показатель –  $r_i^{(a)}$  – оценивается через категоричность задач, выполнение которых отменяется или задерживается вследствие возникшей нештатной ситуации (например, в системах газоснабжения категоричность может определяться через процентное распределение категорий потребителей энергии, пострадавших в случае нештатной ситуации из-за прекращения поставок газа). Показатель  $r_i^{(a)}$  оценивает недопоставки продукции по сравнению с идеальным режимом функционирования системы в целом, является расчетным и тесно связан с показателем мощности объекта, входящего в систему, который рассчитывается с помощью соответствующих моделей функционирования объекта (для компрессорных (КС) и газораспределительных (ГРС) станций и подземных хранилищ газа – по моделям потоков газа в магистральном газопроводе, для заводов – через суточные объемы отгружаемой продукции и т.п.).

Второй показатель –  $r_i^{(b)}$  – оценивает важность выполнения единицы работы. Это значит: возможны случаи, когда объект становится более привлекательным для нарушителя как более «дефицитный ресурс».  $r_i^{(b)}$  оценивается через предельно допустимые потери ( $\Xi$ , ПДП) в нештатных ситуациях при существующих уровнях технологии и материалах расчетов таких потерь. Это поправочный коэффициент, учитывающий все категории потребителей и топологию их размещения в регионе. До достижения уровня ПДП  $r_i^{(b)}$  может рассматри-

ваться как линейная функция  $r_i^{(b)} = \frac{\xi_i}{\Xi}$ , где

$\xi_i$  – текущий уровень потерь. При превышении же уровня ПДП  $r_i^{(b)}$  принимается равным 1.

Третий показатель –  $r_i^{(c)}$  – это показатель потенциальной осуществимости запланированной акции (для случая преднамеренных воздействий на объект), связанной с возможностью доставки средств поражения, наличием в регионе расположения поражаемого объекта

потенциальных сообщников и т.п. По аналогии с техническими системами  $r_i^{(c)}$  показывает уровень агрессивности внешней среды, в которой функционирует объект. Это безразмерная величина, рассчитываемая по эмпирически подобранному статистическим данным о характеристиках объектов в привязке к их территориальному размещению и имеющая смысл показателя безусловной уязвимости объекта, на котором инициируется сценарий  $i$ -й нештатной ситуации. Для случая природных воздействий этот показатель характеризует уровень угроз стихийных бедствий на территории функционирования объектов.

Четвертый показатель –  $r_i^{(d)}$  – строится на основе ранжирования типов объектов. Он отражает свойство относительной «восприимчивости» объектов данного типа в широком диапазоне изменений внешних факторов, определяющих  $r_i^{(c)}$ . Значения  $r_i^{(d)}$  используются таким образом, чтобы привести оценки рисков нештатных ситуаций, инициированных событиями на объектах различных типов, к единой шкале. Это поправочный коэффициент, характеризующий тип (группу) объектов. Он нормирует среднюю доступность точек приложения поражающих средств в зависимости от «компоновочных характеристик» объектов в ЕСГ, корректирует величины эффектов от поражения (например, в случае системы газоснабжения ГРС ближе к потребителю и часто не имеет дублеров, а КС, напротив, имеет, как правило, и внутрицеховое переключение газоперекачивающих агрегатов, и разветвленную систему лупингов на многониточных магистральных).

Предложенная [15] схема вычисления интегрального риска главным образом предназначена для предварительного анализа вариантов развития системы на основе иерархии показателей, характеризующих все аспекты нештатных ситуаций, включая как оценки последствий  $r_i^{(a)}$  и  $r_i^{(b)}$ , так и оценки причин  $r_i^{(c)}$  и  $r_i^{(d)}$ . Введенные базовые показатели строятся через свертки ресурсных показателей, имеющих натуральное выражение, однако формулы сверток приходится реконструировать экспертным путем. Специфика использования свертки показателей в виде мультипликаторов [15] связана с тем, что восприятие ожидаемых потерь (впрочем, как и природных сигналов) органами чувств человека имеет логарифмическую шкалу.

## Решение задачи синтеза риска редких событий

### Модель взаимодействия объекта с окружающей средой и алгоритм построения оптимального профиля защищенности

Предполагаем, что важность объекта для системы определяется его важностью в самом предельном случае, когда отсутствуют резервы и возможности оперативного устранения последствий разрушительного воздействия на него. Однако возникает вопрос, как моделировать существующее многообразие вариантов воздействий на исследуемые объекты?

Предлагается использовать подход [16, 17], заключающийся в том, что воздействия (угрозы) классифицируются по уровню опасности  $j$  ( $j = 0, 1, \dots, J$ ). Нулевой уровень ( $j = 0$ ) соответствует самому низкому уровню опасности. Максимальный уровень ( $j = J$ ) соответствует опасности потерять объект. По аналогии с террористическими актами как наиболее подготовленной формой преднамеренных воздействий на защищаемые объекты можно говорить о сверхподготовленной диверсионной группе. Отличие от случая террористического воздействия в том, что на реализацию атаки нарушителем  $j$ -го уровня необходимо  $Z_j$  единиц ресурсов, а у воздействий стихийных природных явлений таких ограничений нет.

В результате реализации угрозы того или иного уровня опасности  $k$ -му объекту через его полный (или частичный) выход из работоспособного состояния будет нанесен определенный ущерб ( $X$ ). С учетом того, что не каждая угроза априори приводит к успеху, профиль защиты  $k$ -го объекта может быть описан интервальными представлениями посредством задания четырех матриц:

$$Q_{\min}^{[k]}(i, j), Q_{\max}^{[k]}(i, j), X_{\min}^{[k]}(i, j), X_{\max}^{[k]}(i, j), \quad (6)$$

где  $i$  ( $i = 0, 1, \dots, I^{[k]}$ ) – уровень защиты  $i$ -го объекта (нулевой уровень ( $i = 0$ ) соответствует текущему состоянию защиты).

Интерпретация элементов матрицы такова: если на указанный объект  $k$  с уровнем защиты  $i$  будет осуществлено воздействие угрозы с уровнем опасности  $j$ , то с вероятностью от  $Q_{\min}^{[k]}(i, j)$  до  $Q_{\max}^{[k]}(i, j)$  объекту будет нанесен ущерб величиной от  $X_{\min}^{[k]}(i, j)$  до  $X_{\max}^{[k]}(i, j)$ . Ясно, что величины (6) будут расти по мере роста уровня опасности  $j$  и снижаться по мере возрастания уровня защищенности объекта  $i$ . Очевидно также, что защита на любом уровне требует определенных материальных затрат как со стороны эксплуатирующей объект организации, так и со стороны государства. Обозначим затраты на создание и поддержание защиты объекта  $k$  на  $i$ -м уровне как  $Y^{[k]}(i^{[k]})$ . Поскольку суммарный ресурс, выделяемый на защиту всех объектов, ограничен, должно выполняться неравенство

$$\sum_k Y^{[k]}(i^{[k]}) \leq Y, \quad (7)$$

где  $Y$  – сумма всех затрат на защиту объектов при условии, что для каждого объекта  $k$  выбран вариант системы защиты  $i^{[k]}$ .

Рассматривается весь спектр воздействий в предположении, что не существует преимуществ выбора цели и варианта воздействия, поэтому «оптимальный» профиль защищенности объектов может бы быть достигнут посредством последовательного выполнения следующего алгоритма:

- шаг 1 – оценить вероятности  $\lambda^{[k]}(j)$  воздействия на каждый  $k$ -й объект угрозы  $j$ -го уровня опасности;
- шаг 2 – рассчитать медианное значение риска от реализации угрозы для  $k$ -го объекта  $j$ -го уровня опасности при  $i^{[k]}$ -м варианте реализации системы защиты объекта:

$$R[k; i^{[k]}] = \sum_{j=0}^J \left\{ \lambda^{[k]}(j) \left( \frac{Q_{\min}^{[k]}(k) + Q_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \left( \frac{X_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + X_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \right\}; \quad (8)$$

- шаг 3 – определить величину предотвращенного риска на единицу вложенных в защиту средств:

$$\theta[k; i^{[k]}] = \frac{R[k; i^{[k]}]}{Y^{[k]}(i^{[k]})}; \quad (9)$$



- шаг 4 – выбрать для каждого  $k$ -го объекта максимальное из значений  $\theta[k, i^{[k]}]$ :

$$\theta[k, i^{*[k]}] = \max_{i^{[k]}} \{\theta[k, i^{[k]}\}, \quad (10)$$

т.е. при выбранном варианте  $i^{*[k]}$  наблюдается максимальное снижение риска на единицу вложенных средств для  $k$ -го объекта;

- шаг 5 – составить ранжированный перечень объектов, располагая их по убыванию значений показателя  $\theta[k, i^{*[k]}]$ , далее отсчитать первые  $\tilde{K}$  объектов в списке так, что суммарные затраты на их защиту вкладываются в выделенные средства  $Y$ , а на  $(\tilde{K} + 1)$ -й объект ресурсов не хватает.

Суть вышеописанной процедуры предельно проста: нет смысла изыскивать средства на дополнительную защиту тех объектов, которым ничто не грозит (вероятности  $\lambda^{[k]}(j)$  малы). Также нецелесообразно защищать дополнительно те объекты, временная потеря работоспособности которых практически не сказывается на величине суммарных потерь (соответственно, малы  $X_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)$ ). И, наконец, дополнительная защита нецелесообразна на тех объектах, которые уже защищены настолько хорошо, что снижение потерь может быть принципиально достигнуто, но неадекватно большими средствами (т.е. малы значения  $\theta[k, i^{*[k]}]$ ).

Ключевым моментом описанного выше алгоритма является составление ранжированного перечня объектов по критерию минимизации математического ожидания потерь на единицу средств, вложенных в их защиту, а из формулы (8) следует необходимость сбора и оценки данных по трем компонентам: 1) величинам потерь, вызванных реализацией атак  $X_{\min}^{[k]}(i, j), X_{\max}^{[k]}(i, j)$ ; 2) показателю «агрессивности среды»  $\lambda^{[k]}(j)$ ; 3) зависимости рисков от типов объектов  $k$ .

Значения  $X$ , вследствие того что объекты системы, как правило, не являются автономными предприятиями, должны отражать системный эффект (или социально-экономический мульти-эффект), который существенно возрастает в зависимости от того, какие из потребителей продукции объекта, подвергнувшегося воздействию, пострадают из-за снижения его работоспособности. Следовательно, необходимо рассматривать не средние, а верхние границы показателей ущербов и ввести в рассмотрение дополнительный компонент – показатель важности непрерывного функционирования объекта в связи с каскадным эффектом усиления последствий потери работоспособности объекта для других объектов народного хозяйства.

И, наконец, дополнительно требуется ввести еще один, необходимый для адекватного ранжирования объектов, компонент. Потребность в нем обусловлена тем, что существуют дополнительные обстоятельства, смещающие значения  $\lambda^{[k]}(j)$  в сторону от «средневзвешенных по отрасли». Учесть эти обстоятельства и поможет коэффициент  $\mu^{[k]}$ , изначально равный для всех объектов единице, который на основании заключения ЛПР или экспертов может быть увеличен таким образом, чтобы повысить приоритет включения именно  $k$ -го объекта в список объектов, оснащаемых дополнительными мерами защиты по причинам, не учитываемым общими для всех объектов правилами.

Обозначим через  $\delta^{[k]}(i, j)$  характеристическую функцию, которая означает, что против  $k$ -го объекта с предполагаемым уровнем защиты  $i$  ( $i = 0, 1, \dots, I^{[k]}$ ) ожидается воздействие уровня  $j$  ( $j = 0, 1, \dots, J^{[k]}$ ). Если для всех  $i$  значения  $\delta^{[k]}(i, j)$  равны нулю, то  $k$ -й объект не будет подвержен воздействию уровня  $j$ . Если при всех  $j$  и всех  $i$  значения  $\delta^{[k]}(i, j)$  равны нулю, то  $k$ -й объект при варианте воздействия полностью выбывает из списка целей. И, наконец, если для некоторого  $\tilde{i}$  значение  $\delta^{[k]}(\tilde{i}, j(\tilde{i})) = 1$ , мы считаем, что объект  $k$  с уровнем защиты 0 «выбран» как цель для воздействия угрозы уровнем опасности  $j(\tilde{i})$ .

Перечисленные свойства записываются системой равенств:

$$\begin{cases} \forall k \forall i \forall j \delta^{[k]}(i, j)(1 - \delta^{[k]}(i, j)) = 0, \\ \forall k \left( \sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^J \delta^{[k]}(i, j) - 1 \right) \left( \sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^J \delta^{[k]}(i, j) \right) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Учитывая, что

$$\forall j \sum_{i=0}^{I_k} \sum_k \delta^{[k]}(i, j) = N_j, \quad (12)$$

а также ограничения, мы получаем оценку суммарного ущерба, наносимого объекту:

$$\tilde{R} = \sum_k \sum_{i=0}^{I_k} \sum_{j=0}^J \left\{ \delta^{[k]}(i, j) \left( \frac{Q_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + Q_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \left( \frac{X_{\min}^{[k]}(i^{[k]}, j) + X_{\max}^{[k]}(i^{[k]}, j)}{2} \right) \right\}. \quad (13)$$

Обозначив  $\tilde{R}$  как  $\tilde{R}(Var_I, Var_J)$ , подчеркивая, что  $\tilde{R}$  зависит как от варианта защиты объектов  $Var_I$ , так и от варианта воздействия  $Var_J$ , ищем максимум  $\tilde{R}$  для всех вариантов воздействия, удовлетворяющих ограничениям, при рассмотрении всех вариантов оснащения дополнительной защитой в качестве параметров:

$$\tilde{R}^*(Var_I) = \max_{Var_J} \{ \tilde{R}(Var_I, Var_J) \}. \quad (14)$$

Тем самым постулируется, что выбирается самый худший для защищающейся стороны сценарий. Следовательно, задача защиты сводится к ограничению «множества выбора» воздействий: ищется такое усиление объектов, которое минимизирует  $\tilde{R}^*(Var_I)$ , а задача управления безопасностью сводится к поиску равновесного значения  $\tilde{R}^{**}$ :

$$\tilde{R}^{**} = \min_{Var_I} \{ \tilde{R}^*(Var_I) \}. \quad (15)$$

Предлагаемая постановка имеет типовой вид задач теории игр. Решением такой задачи является *равновесие по Нэшу* – седловая точка  $(Var_I^*, Var_J^*)$ :

$$\tilde{R}^{**} = \tilde{R}(Var_I^*, Var_J^*). \quad (16)$$

В этой точке эксплуатирующей организации не выгодно менять стратегию оснащения  $Var_I^*$ , поскольку вне этой стратегии появляются возможности для нанесения более «чувствительных» ударов (реализации более опасных угроз). Задача в такой постановке теоретически имеет очень большую размерность, обладает большой комбинаторной сложностью, но вполне решается вследствие монотонности используемых критериев и линейности систем ограничений. Конечно, следует помнить, что речь идет только об оценках.

Из-за неустранимой неопределенности оценок в качестве решения задачи о выработке стратегии и тактики усиления защиты объектов от реализации возможных угроз редких событий, включая террористические акты и атаки диверсионных групп, целесообразно «заглубить» игровую постановку [18]. При этом идеализируются «возможности» угрожающей стороны и ужесточаются характеристики возможных потерь, например, путем перехода от медианных оценок рисков к максимальным. В случае осмысленных воздействий на объекты выработка плана противником начинается с процедуры выбора целей, т.е. их ранжирования.

### Алгоритм построения критериальной функции выбора

Многие существующие на сегодняшний день рейтинговые системы отталкиваются только от результатов оценки одного из показателей, описывающих объекты [19, 20]. Однако, так как на практике приходится иметь дело с большим числом оценок по частным критериям, важность которых заранее не известна, возникает так называемая задача многокритериального ранжирования [21–23]. Данная задача относится к многокритериальным задачам выбора в условиях неопределенности [24, 25], имеющим большое значение для анализа систем самого различного назначения [26, 27].

Определим на некотором множестве объектов  $O = \{O_1, \dots, O_D\}$  логическую функцию выбора  $\pi: \pi(o) \rightarrow \{0, 1\}$ , которая указывает, что альтернатива  $o$  отобрана в некоторое подмножество  $\pi(o)$  ( $\pi(o) = 1$ ) или нет ( $\pi(o) = 0$ ). Подмножество  $\pi(o)$ , в частности, может являться подмножеством наиболее системно значимых объектов системы или же подмножеством объектов, для которых потенциально необходимо реализовать дополнительные меры защиты. В общем случае функции выбора могут быть произвольными, но для того чтобы их использование давало корректное описание актов выбора, необходимо на вид  $\pi(o)$  наложить ряд ограничений, или так называемых аксиом выбора (например, см. [13]).

Дальнейший алгоритм выбора достаточно прост.

**Шаг 1.** Применяя функцию  $\pi(o)$ , находим наиболее системно важные объекты  $\pi(O = O^{[1+]}) = O^{[1]} = \{o_{1,1}, \dots, o_{1,D_1}\}$ . Далее, «удаляя»  $D_1$  объектов, вошедших в  $O^{[1]}$  из  $O$ , получаем возможность осуществить выбор на множестве оставшихся объектов  $O^{[2+] = O^{[1+]} \setminus O^{[1]}$ .

**Шаг 2.** Определяются  $D_2$  объектов  $\pi(O^{[2+]}) = O^{[2]} = \{o_{2,1}, \dots, o_{2,D_2}\}$  с их последующим удалением:  $O^{[3+]} = \frac{O^{[2+]}}{O^{[2]}}$ .

Далее процедура выбора и удаления на  $s$ -м шагу ( $s = 3, 4, \dots$ ) повторяется:

$$\begin{cases} \pi(O^{[s+]}) = O^{[s]} = \{o_{s,1}, \dots, o_{s,D_s}\}; \\ O^{[s+1+]} = O^{[s+]} \setminus O^{[s]}, \end{cases} \quad (17)$$

и алгоритм завершается, когда все объекты из множества  $O$  будут «разобраны» по множествам  $O^{[s]}$ :

$$\begin{cases} O = O^{[1]} \cup O^{[2]} \cup \dots \cup O^{[s]}; \\ D = D_1 + D_2 + \dots + D_s. \end{cases} \quad (18)$$

Правило определения значимости любого объекта при таком конструктивном решении просто: объект тем более значим, чем на более раннем шаге  $s$  он выбран в качестве элемента множества  $O^{[s]}$ . Объекты, оказавшиеся в одном  $O^{[s]}$ , считаются равнозначимыми.

К настоящему времени сложился ряд стандартизованных подходов к описанию выбора. Простейший вариант – предположить, что для всех альтернатив  $x \in X$  может быть задана функция  $Q(x)$ , которая называется критерием (критерием качества, целевой функцией, функцией предпочтения, функцией полезности и т.д.) и обладает тем свойством, что если альтернатива  $x_2$  предпочтительнее альтернативы  $x_1$ , то  $Q(x_2) > Q(x_1)$ . Выбор как максимизация критерия сводится к поиску такого значения  $x^* \in X$ , при котором достигается максимум функции  $Q(x)$  на множестве альтернатив  $X$ :  $x^* = \operatorname{argmax} Q(x)$ . Построить функцию полезности  $Q(x)$  либо очень сложно, либо практически невозможно, так как сравниваемые варианты сходны с вариантами выбора для человека, когда ему предлагают либо только «пить», либо только «дышать». Вместе с тем идеи построения функций полезности для выбора могут оказаться плодотворными на первичных этапах отбора вариантов, когда ЛПР по ограниченному количеству данных

пытается интерполировать некоторую нелинейную шкалу полезности.

Итак, если при оценке альтернативы  $x$  используются несколько критериев  $q_i(x)$  ( $i = 1, \dots, p$ ) и для  $x$  найдется такая альтернатива  $x^*$ , которая не будет уступать  $x$  по всем критериям  $q_i(x^*) \geq q_i(x)$  ( $i = 1, \dots, p$ ), и при этом имеется хотя бы один критерий  $q_j(x)$  ( $j \in \{1, \dots, p\}$ ), такой что по этому критерию выполняется строгое предпочтение  $q_j(x^*) > q_j(x)$ , то будем говорить, что  $x^*$  доминирует над  $x$ , а альтернатива  $x$  по отношению к  $x^*$  является доминируемой. Введенное таким образом соотношение элементов множества альтернативных вариантов задает на этом множестве *отношение частичного порядка*.

Вариант  $x \in X$  называют оптимальным по Парето, если не существует ни одного варианта  $x^* \in X$ , доминирующего над  $x$ . Выделение множества Парето-оптимальных решений является первым этапом поиска оптимальных альтернатив. По построению элементы этого множества не сравнимы между собой, при этом ни одно из Парето-оптимальных решений нельзя улучшить по какому-либо критерию, не ухудшая значения других критериев. Множество Парето-оптимальных решений строится путем отбрасывания доминируемых вариантов. Изначально Парето-оптимальное множество содержит альтернативы с максимальными значениями частных критериев.

Однотипность объектов предполагает, что для них можно предложить ряд переменных описания  $x_1, x_2, \dots, x_N$  (ресурсных критериев), а также задать скалярную функцию  $Q(x_1, x_2, \dots, x_N)$ , которая для каждого объекта  $o$  принимает значение  $Q(x_1(o), x_2(o), \dots, x_N(o))$  и называется критерием (см. выше). Выбор наиболее значимого объекта, если функция  $Q(x_1, x_2, \dots, x_N)$  каким-то способом ранее построена, сводится к поиску такого объекта  $o^*$ , для которого критерий значимости  $Q(x_1(o^*), x_2(o^*), \dots, x_N(o^*))$  имеет наибольшее значение. Однако для сложных многоцелевых объектов корректное построение критерия  $Q(\vec{x})$  – очень трудоемкая задача. Наиболее распространенный способ: «экспертно» задать оценки  $Q(\vec{x})$  некоторой ограниченной совокупности объектов – «обучающей» выборке  $O_{\text{learn}} \subset O = \{o_1, o_2, \dots, o_D\}$  – и, полагая, что истинная функция  $Q(\vec{x})$  принадлежит некоторому классу параметризованных функций  $Q(\vec{x}) = Q(\vec{x}, \operatorname{par}^*)$ , решить задачи экстраполяции оценок  $\tilde{Q}(\vec{x})$  на все множество объектов  $O$



посредством определения «оптимальной» комбинации параметров  $\text{par}^*$ , при которой известные значения оценок  $\tilde{Q}(\vec{x})$  для объектов из обучающей выборки приближаются наилучшим образом в метрике  $\|\dots\|_p$ :

$$\sum_{o \in O'} Q(x(o), \text{par}) - \tilde{Q}(x(o)) \rightarrow \min_{\text{par}}. \quad (19)$$

Набор  $\text{par}^*$ , являющийся решением задачи (19), определяет искомую критериальную функцию  $Q(\vec{x}) = Q(\vec{x}, \text{par}^*)$ . Для определения  $\text{par}^*$  наиболее часто используются методы интерполяции, регрессионные методы типа метода наименьших квадратов, методы локальной аппроксимации. В последнее время широкое распространение получили методы нейроматематики: для построения  $Q(\vec{x}, \text{par}^*)$  на обучающей выборке  $O_{\text{learn}}$  осуществляется настройка параметров искусственной нейронной сети с последующим ее использованием для вычисления  $Q(\vec{x})$  на  $O/O_{\text{learn}}$  для объектов, не вошедших в обучающую выборку.

### Обсуждение результатов

Специфика конкретных решений обусловлена тем, что в разных случаях используются различные способы задания ограничений и правил связывания отдельных списков между собой, а также различные меры близости расположения объектов внутри списков.

В общем случае объекты сложной системы выполняют неодинаковые функции, по-разному оцениваются результаты их деятельности, а следовательно, важно не только знать, насколько (во сколько раз) один однотипный объект значимее другого, но и уметь сопоставлять оценки объектов различных типов. Для этого требуется ввести дополнительные аксиомы, конкретизирующие классы функций выбора среди разнородных объектов, но следует понимать, что до сих пор общая задача подбора таких аксиом не решена.

Причин тому несколько. Выделим основные.

1. *Большая размерность задачи выбора*: количество объектов, из которых надо выбрать, и количество показателей, которые описывают состояние каждого объекта, значительны. Из-за того, что время, необходимое для осуществления выбора, растет с ростом размерности, требуется агрегирование данных. Наиболее часто применяются сортировка и группировка сходных объектов. При этом упрощения реальных данных (переход от количественных

к балльным и другим качественным показателям) реализуются в ходе выполнения процедур, в которых допускаются умышленное уменьшение точности и потеря информации.

2. *Разнотипность данных*: разные признаки измеряются в разных шкалах, разные объекты описываются различными наборами показателей.

3. *Наличие «пропущенных значений»*: в статистике (по разным причинам) часто наблюдается «эллипсность». Например, авторы текстовых документов опускают «подразумевающиеся» слова, значения «по умолчанию». Часто это неоправдано и объясняется «нехваткой времени».

4. *Зашумленность*: наличие нечетких и случайных показателей. Используемые для выбора варианты «измеренные» значения, как правило, не равны истинным значениям, а лишь «близки» к ним. Для искаженных значений желательно сделать поправки на систематические ошибки. Свойства добавочных искажений различны для объектов различных типов, и варианты выбора должны быть согласованы с вариантами обработки этих искажений.

5. *Многокритериальность*: практически невозможно указать какую-либо одну цель функционирования для «сколько-нибудь сложных объектов». Шкалы, определяющие компоненты целеполагания, называются критериальными шкалами, а соответствующие переменные – критериями. Обычно практические задачи выбора являются многокритериальными.

В силу перечисленных причин задачу ранжирования большой совокупности разнотипных объектов целесообразно решать в несколько этапов. На первом этапе для объектов каждого типа необходимо построить частные модели оценки их системной значимости (риска) и по ним провести ранжирование. На втором этапе – осуществить «сшивку» отранжированных списков объектов в единый перечень. Возможна дополнительная коррекция значений оценок там, где потребуется учесть особые условия функционирования отдельных объектов.

\*\*\*

Описанная методика позволяет структурировать и привести в некоторую систему субъективную информацию о характере неопределенности и ее влиянии на цели системы, в которой функционирует рассматриваемый объект. В ситуациях с объективной

вероятностной неопределенностью подобные подходы позволяют более объективно (по сравнению с байесовым подходом) оценить как ожидаемые потери, так и возможные выгоды от принятия того или иного решения. Кроме того, предлагаемый подход, дополняя и расширяя возможности существующих,

может стать основой для определения экономической эффективности информационных систем (в первую очередь, автоматизированных советующих систем), обеспечивающих принятие решений, направленных на обеспечение безопасности функционирования опасных производственных объектов.

### Список литературы

- Смирнов В.А. О концепции долгосрочного развития Единой газоснабжающей системы страны / В.А. Смирнов // Изв. АН СССР. Сер.: Энергетика и транспорт. – 1981. – № 4.
- Мелентьев Л.А. Оптимизация развития больших систем энергетики / Л.А. Мелентьев. – М.: Высш. шк., 1982. – 319 с.
- Garcia M.L. Vulnerability assessment of physical protection systems / Mary Lynn Garcia. – 1<sup>st</sup> ed. – Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2005.
- Бочков А.В. Категорирование критически важных объектов по уязвимости к возможным противоправным действиям с использованием экспертных методов / А.В. Бочков // Безопасность. Достоверность. Информация. – 2009. – № 1 (82). – С. 22–24.
- Papkov B. The assessment of probabilities and risk of rare events in electric power industry / B. Papkov, A. Kulikov, V. Osokin // E3S Web of Conferences. – 2018. – Т. 58: Rudenko International Conference «Methodological problems in reliability study of large energy systems (RSES 2018)». – № 02003. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185802003>.
- Yang M. Risk assessment of rare events / Ming Yang, Faisal Khan, Leonard Lye, et al. – 2015. – Т. 98. – С. 102–108. – <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.004>.
- Dewoody Y. Assessing risk for rare events / Y. Dewoody, V.T. Gururaj, Clyde Martin // Journal of Applied Statistics. – 1999. – Т. 26. – С. 681–687. – <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02664769922124>.
- Барсуков А.Н. Ситуационные центры. Мониторинг, прогнозирование и управление кризисными явлениями в газовой отрасли. Ч. 1: Мониторинг и прогнозирование / А.Н. Барсуков, А.В. Бочков, В.В. Лесных. – М.: НИИГазэкономика, 2015. – 528 с.
- Хампель Ф. Робастность в статистике. Подход на основе функций влияния / Ф. Хампель, Э. Рончетти, П. Рауссеу и др. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
- Хеттманспергер Т. Статистические выводы, основанные на рангах / Т. Хеттманспергер. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 334 с. – (Математико-статистические методы за рубежом).
- Hodges J.L., Jr. Estimates of location based on rank tests / J.L. Hodges Jr., E.L. Lehmann // Ann. Math. Statistics. – 1963. – Т. 34. – № 2. – С. 598–611.
- Арнольд В.И. Теория катастроф / В.И. Арнольд. – 2-е изд., доп. – М.: МГУ, 1983. – 80 с.
- Knight F.H. The meaning of risk and uncertainty / Frank H. Knight // Knight F. Risk, Uncertainty, and Profit / Frank H. Knight. – Boston: Houghton Mifflin Co, 1921. – С. 210–235.
- Сахал Д. Научно-технический прогресс. Модели, методы, оценки / Д. Сахал. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 367 с.
- Bochkov A. Some methodical aspects of critical infrastructure protection / A. Bochkov, V. Lesnykh, N. Zhigirev, et al. // Safety Science. – 2015. – Т. 79. – С. 229–242. – <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.06.008>.
- Bochkov A. Hazard and risk assessment and mitigation for objects of critical infrastructure / A. Bochkov // Diagnostic techniques in industrial engineering. Management and industrial engineering / M. Ram, J. Davim (eds). – Springer, Cham, 2018. – С. 57–135. – [https://doi.org/10.1007/978-3-319-65497-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65497-3_3).
- Bochkov A. Approaches to the construction of adaptive situation control systems of structurally complex systems under uncertainty / A. Bochkov // Труды международной конференции ISANP-2011, Sorrento (Naples, Italy) June 15–18, 2011.
- Bochkov A. Dynamic multi criteria decision making method for sustainability risk analysis of structurally complex techno-economic systems / A. Bochkov, N. Zhigirev, V. Lesnykh // Reliability: Theory & Applications. – 2012. – Т. 1. – № 2(25). – С. 36–42.

19. Карминский А.М. Рейтинги в экономике: методология и практика / А.М. Карминский, А.А. Пересецкий, А.Е. Петров. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 240 с.
20. Баранов С. Анализ межрегиональной дифференциации и построение рейтингов субъектов Российской Федерации / С. Баранов, Т. Скуфьина // Вопросы экономики. – 2005. – № 8. – С. 54–75.
21. Кини Р. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
22. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2005. – 176 с.
23. Подиновский В.В. Анализ решений при множественных оценках коэффициентов важности критериев и вероятностей значений неопределенных факторов и целевой функции / В.В. Подиновский // Автоматика и телемеханика. – 2004. – № 11. – С. 141–158.
24. Кувшинов Б.М. Использование комитетов в задачах распознавания образов с неточными экспертными оценками / Б.М. Кувшинов, И.И. Шапошник, В.И. Ширяев и др. // Изв. РАН. Сер.: Теория и системы управления. – 2002. – № 5. – С. 81–88.
25. Мазуров В.Д. Метод комитетов в задачах оптимизации и классификации / В.Д. Мазуров. – М.: Наука, 1990. – 248 с.
26. Жуковский В.И. Кооперативные игры при неопределенности и их приложения / В.И. Жуковский. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 336 с.
27. Квейд Э. Анализ сложных систем / Э. Квейд. – М.: Сов. Радио, 1969. – 520 с.

## Special analysis and assessment of risk indicators for rare events in regard to dangerous industrial facilities

A.V. Bochkov<sup>1\*</sup>, V.S. Safonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazprom Gaznadzor LLC, Bld. 65, Novocheremushkinskaya street, Moscow, 117418, Russian Federation

<sup>2</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

\* E-mail: a.bochkov@gmail.com

**Abstract.** Risk assessment of rare events belongs to key challenges for analytics concerned with support of safe operation of the dangerous industrial facilities. The associated troubles are used to be explained by the uncertainty of factors affecting decision-making. Different patterns of Bayesian statistics are mostly applied. Particular case is emphasized when the uncertainty doesn't demonstrate any classical statistical behavior, and can be characterized only by the subjective ideas of headmen and their experts. As a matter of fact, the Bayesian approach today is the only complete technique of decision-making in conditions of uncertainty. Many experts reasonably criticize this method, but up to this day there is no any good alternative.

The authors of this article suggest a choice logic which differs from a common one. They present a technique aimed to construct a function of integral risk for rare events at dangerous industrial facilities, and generally describe an algorithm selecting the most systemically important events in the light of their diversity.

**Keywords:** rare events, risk synthesis, uncertainty, choice function, Pareto-optimal family, ranking.

### References

1. SMIRNOV, V.A. On idea of long-term development of the domestic Unified Gas Supply System [O kontseptss dolgosrochnogo razvitiya Yedinoj gazosnabzhayushchey sistemy strany]. *Izvestiya AN SSSR. Series: Energetika i Transport*, 1981, no. 4. (Russ.).
2. MELENTYEV, L.A. *Optimization of development of large power systems* [Optimizatsiya razvitiya bolshikh sistem energetiki]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. (Russ.).
3. GARCIA, M.L. *Vulnerability assessment of physical protection systems*. 1<sup>st</sup> ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2005.
4. BOCHKOV, A.V. Application of expert methods for categorizing critically important objects according to their vulnerability to possible evil acts [Kategorirovaniye kriticheski vaznykh obyektov po uyazvimosti k vozmozhnym protivopravnym deystviyam s ispolzovaniyem ekspertnykh metodov]. *Bezopasnost. Dostovernost. Informatsiya*, 2009, no. 1(82), pp. 22–24. (Russ.).
5. PAPKOV, B., A. KULIKOV, V. OSOKIN. The assessment of probabilities and risk of rare events in electric power industry. In: *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 58: Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems (RSES 2018)”, no. 02003. Available from: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185802003>

6. YANG, M., F. KHAN, L. LYE, et al. Risk assessment of rare events. *Process Safety and Environmental Protection*, 2015, vol. 98, pp. 102–108. ISSN 0957-5820. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.004>
7. DEWOODY, Y., V.T. GURURAJ, C. MARTIN. Assessing risk for rare events. *Journal of Applied Statistics*, 1999, vol. 26, pp. 681–687. ISSN 0266-4763. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02664769922124>
8. BARSUKOV, A.N., A.V. BOCHKOV, V.V. LESNYKH. *Situation centers. Monitoring, prediction and control of crisis phenomena in gas industry* [Situatsionnyye tsentry. Monitoring, prognozirovaniye i upravleniye krizisnymi yavleniyami v gazovoy otrasli]. Pt. 1: *Monitoring and prediction* [Monitoring i prognozirovaniye]. Moscow: NIlgazekonomika, 2015. (Russ.).
9. HAMPEL, F.R., E.M. RONCHETTI, P.J. ROUSSEEUW, et al. *Robust statistics: The approach based on influence functions* [Robastnost v statistike. Podkhod na osnove funktsiy vliyaniya]. Translated from Engl. Moscow: Mir, 1989. (Russ.).
10. HETTMANSPERGER, Th.P. *Statistical inference based on ranks* [Statisticheskiye vyvody, osnovannyye na rangakh]. Translated from Engl. Moscow: Finansy i statistika, 1987. (Russ.).
11. HODGES, J.L., Jr., E.L. LEHMANN. Estimates of location based on rank tests. *Ann. Math. Statistics*, 1963, vol. 34, no. 2, pp. 598–611. ISSN 0003-4851.
12. ARNOLD, V.I. *Theory of disasters* [Teoriya katastrof]. 2<sup>nd</sup> ed., revised. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 1983. (Russ.).
13. KNIGHT, F.H. The meaning of risk and uncertainty. In: KNIGHT, F. *Risk, Uncertainty, and Profit*. Boston: Houghton Mifflin Co, 1921, pp. 210–235.
14. SAKHAL, D. *Scientific-technical progress. Models, methods, estimations* [Nauchno-tekhnicheskiy progress. Modeli, metody, otsenki]. Moscow: Finansy i statistika, 1985. (Russ.).
15. BOCHKOV, A., V. LESNYKH, N. ZHIGIREV, et al. Some methodical aspects of critical infrastructure protection. *Safety Science*, 2015, vol. 79, pp. 229–242. ISSN 0925-7535. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.06.008>.
16. BOCHKOV, A. Hazard and risk assessment and mitigation for objects of critical infrastructure. In: RAM, M., J. DAVIM (eds). *Diagnostic techniques in industrial engineering. Management and industrial engineering*. Springer, Cham, 2018, pp. 57–135. Available from: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-65497-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65497-3_3).
17. BOCHKOV, A. Approaches to the construction of adaptive situation control systems of structurally complex systems under uncertainty. In: *ISAHP-2011*, Sorrento (Naples, Italy) June 15–18, 2011.
18. BOCHKOV, A., N. ZHIGIREV, V. LESNYKH. Dynamic multi criteria decision making method for sustainability risk analysis of structurally complex techno-economic systems. *Reliability: Theory & Applications*. 2012, vol. 1, no. 2(25), pp. 36–42. ISSN 1932-2321. (Russ.).
19. KARMINSKIY, A.M., A.A. PERESETSKIY, A.Ye. PETROV. *Ranking in economics: methodology and practice* [Reytingi v ekonomike: metodologiya i praktika]. Moscow: Finansy i statistika, 2005. (Russ.).
20. BARANOV, S, T. SKUFYINA. Analysis of intraregional differentiation and ranking constituent entities of Russian Federation [Analiz mezhhregionalnoy differentsiatsii i postroyeniye reytingov subyektov Rossiyskoy Federatsii]. *Voprosy Ekonomiki*. 2005, no. 8, pp. 54–75. ISSN 0042-8736. (Russ.).
21. KEENEY, R.L., H. RAIFFA. *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs* [Prinyatiye resheniy pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zameshcheniya]. Translated from Engl. Moscow: Radio i svyaz, 1981. (Russ.).
22. NOGIN, V.D. *Decision-making in a multicriteria medium: a quantitative approach* [Prinyatiye resheniy v mnogokriterialnoy srede]. Moscow: Fizmatlit, 2005. (Russ.).
23. PODINOVSKIY, V.V. Analysis of solutions in case of multiply assessments of criterion importance factors and value probabilities for inexplicit factors and an objective function [Analiz resheniy pri mnozhestvennykh otsenkakh koeffitsiyentov vazhnosti kriteriyev i veroyatnostey znacheniy neopredelennykh faktorov i tseloy funktsii]. *Avtomatika i Telemekhanika*. 2004, no. 11, pp. 141–158. ISSN 0005-2310. (Russ.).
24. KUVSHINOV, B.M., I.I. SHAPOSHNIK, V.I. SHIRYAYEV, et al. Application of coterics in problems of pattern recognition with inexact expert assessments [Ispolzovaniye komitetov v zadachakh raspoznavaniya obrazov s netochnymi ekspertnymi otsenkami]. *Izvestiya RAN. Series: Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2002, no. 5, pp. 81–88. ISSN 0002-3388. (Russ.).
25. MAZUROV, V.D. *Method of coterics in optimization and classification tasks* [Metod komitetov v zadachakh optimizatsii i klassifikatsii]. Moscow: Nauka, 1990. (Russ.).
26. ZHUKOVSKIY, V.I. Collaborative games in conditions of uncertainty and their applications [Kooperativnyye igry pri neopredelennosti i ikh prilizheniya]. Moscow: Editorial URSS, 1999. (Russ.).
27. QUADE, E.S. *Analysis for military decisions* [Analiz slozhnykh system]. Translated from Engl. Moscow: Sovetskoye radio, 1969. (Russ.).