

УДК 004.492.2

## ОЦЕНКА РИСКОВ ФИЗИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

**Кукало Иван Анатольевич,**

аспирант кафедры радиоэлектроники и защиты информации  
ФГБОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники», Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.  
E-mail: i@kukalo.ru

**Гривцов Сергей Николаевич,**

ведущий специалист отдела охраны магистральных нефтепроводов  
Службы безопасности ОАО «Центрсибнефтепровод»,  
Россия, 634050, г. Томск, ул. Набережная р. Ушайки, д. 24.  
E-mail: GrivtsovSN@tom.transneft.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью защиты объектов топливно-энергетического комплекса от совершения актов незаконного вмешательства.*

**Цель работы:** обобщение и развитие методики оценки рисков в иерархических структурах критически важных объектов для пространственно-распределенных линейных объектов топливно-энергетического комплекса типа линейная часть магистрального нефтепровода.

**Методы исследования:** Математическое моделирование распределения вероятности рисков события, экспертная оценка методом Дельфи, методом ранжирования, метод непосредственной оценки, численное интегрирование двумерной функции риска во времени и пространстве, интерполяция функции траектории проведенного мероприятия.

**Результаты:** Предложена методика оценки риска физической безопасности для линейной части магистрального нефтепровода, реализующая концепцию ГОСТ Р ИСО 31000–2010. Проведена идентификация рисков физической безопасности линейной части магистрального нефтепровода, разработана математическая модель оценки рисков для пространственно-распределенных линейных объектов топливно-энергетического комплекса типа линейная часть магистрального нефтепровода для проведения анализа и сравнительной оценки риска. Модель позволяет рассчитать пространственно-временное распределение величины риска физической безопасности, которое основывается на предположении о двумерном дискретном случайном распределении вероятности рисков события. Результирующее значение величины риска физической безопасности определяется на основе данных о проведенных мероприятиях по контролю защищенности линейного объекта. Произведен расчет выходных параметров модели для участков магистрального нефтепровода «Александровское–Анжеро-Судженск» с учетом входных параметров, предоставленных ОАО «Центрсибнефтепровод».

### **Ключевые слова:**

Оценка рисков, магистральный нефтепровод, физическая безопасность, матрица распределения риска, пространственно-временное распределение, накопленный риск, уровень риска.

Основные меры по обеспечению безопасности линейных объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в Российской Федерации устанавливаются Федеральным законом [1]. Известные подходы к управлению безопасностью систем масштаба ТЭК в значительной мере базируются на процедуре категорирования опасных объектов, в результате которой объектам одной категории предъявляются единые требования по обеспечению безопасности [2]. Альтернативой процедуре категорирования, как известно, является подход по управлению рисками систем физической безопасности (УР-СФБ). Создание методик, реализующих данный подход, сопряжено с необходимостью решения нескольких взаимосвязанных задач, включающих установление области применения, оценку риска и обработку риска [3]. Пример формальной реализации такого подхода для иерархических структур критически важных пространственно-локализованных объектов дан в работе [4]. В работах [5–7] предложены аналогичные концепции управления рисками различных систем –

информационных, кибернетических, транспортных, таможенных, банковских и др.

К сожалению, указанные методики управления рисками не могут охватить всего многообразия действующих систем физической безопасности (ФБ). Одним из факторов, ограничивающих метод оценки рисков [4], является допущение о точечном характере объекта УР-СФБ. Это допущение исключает из рассмотрения множество пространственно-распределенных систем. К таковым, в частности, относится линейная часть магистрального нефтепровода (ЛЧ МН), характеризующаяся пространственно-протяженной и многосвязной инфраструктурой [8]. Особенности ЛЧ МН осложняют задачу обеспечения безопасности ТЭК, не позволяя использовать для этой цели стандартные методики УР-СФБ, ориентированные на точечные объекты.

Целью настоящей работы является обобщение и развитие методики оценки рисков в иерархических структурах критически важных объектов [4] для пространственно-распределенных линейных

объектов ТЭК типа ЛЧ МН, учитывая зарубежные [9–11] и отечественные [12, 13] разработки по управлению эксплуатационными рисками МН.

Процедура оценки риска, как известно, является ключевым этапом управления рисками и представляет собой процесс, объединяющий идентификацию, анализ и сравнительную оценку риска [14]. Данная процедура основывается на моделях злоумышленника и угроз СФБ, которые для объектов ЛЧ МН были описаны в работе [15]. Таким образом, разрабатываемая методика является основой для создания специализированной модели управления рисками линейных объектов ТЭК, которая позволит реализовать заключительный этап процесса управления рисками – обработку риска ФБ [3].

На первом этапе оценки риска системы ЛЧ МН рассмотрим перечень источников риска и событий. Считаем, что множество источников рисков событий для ЛЧ МН совпадает с множеством угроз [15].

Возможный перечень источников рисков событий для типового линейного объекта – ЛЧ МН, представлен в табл. 1.

**Таблица 1.** Перечень источников рисков событий

| $\rho_i$ | Источник рисков события             | Описание источника  |
|----------|-------------------------------------|---|
| $\rho_1$ | Группа доступных элементов          | Лицо или группа лиц, действующие согласованно с целью совершения акта незаконного вмешательства для получения выгоды  |
| $\rho_2$ | Внутренние нарушители               | Лицо или группа лиц, обладающих правом доступа на объект в силу выполнения служебных или иных обязанностей  |
| $\rho_3$ | Диверсионно-террористическая группа | Подразделение, используемое для совершения диверсионно-террористических актов уничтожения или временного выведения из строя важнейших объектов топливно-энергетического комплекса |

Анализ известных угроз [15] и рисков событий позволил выявить множество возможных рисков событий для линейного объекта  $S$  как  $r_{i\beta}$ . Отметим, что для ЛЧ МН каждому риску событию соответствует одна угроза безопасности.

Рассмотрим возможный вариант задания элементов множества рисков событий, представленный в табл. 2.

Перейдем далее к анализу риска, включающего оценку вероятности и последствий идентифицированных опасных событий с учетом наличия и эффективности применяемых способов управления [14]. Для учета особенностей пространственно-протяженных линейных объектов, руководствуясь общими принципами моделирования [16], опишем концептуальную модель оценки риска. С этой целью выделим основные понятия:

- акт незаконного вмешательства – противоправное действие (бездействие), угрожающее безопасному функционированию линейного объек-

та, повлекшее за собой повреждение или уничтожение имущества либо создавшее угрозу наступления таких последствий [1];

- риск ФБ – количественная оценка сочетания вероятности и последствий совершения акта незаконного вмешательства [3];
- линейный объект – линия электропередачи, линия связи (в том числе линейно-кабельные сооружения), трубопровод, автомобильная дорога, железнодорожная линия и другие подобные сооружения [17];
- контрольные мероприятия – мероприятия по контролю защищенности линейного объекта, направленные на выявление совершенных актов незаконного вмешательства.

**Таблица 2.** Перечень рисков событий системы  $S$

| $r_{i\beta}$ | Наименование рисков события  | Источники рисков событий | Описание угрозы   |
|--------------|--|--------------------------|---|
| $r_1$        | Хищение нефти с использованием действующей врезки в ЛЧ МН либо регулярный отбор нефти через вдоль-трассовое оборудование | $\rho_1, \rho_2$         | Установка патрубка с задвижкой с последующим нарушением целостности трубопровода для несанкционированной кражи нефти, взлом вантузов, камер приема-пуска средств очистки и диагностики, запорной арматуры и др. технологических устройств с целью несанкционированной кражи нефти |
| $r_2$        | Кража вдоль-трассового оборудования  | $\rho_1, \rho_2$         | Кража вдоль-трассового оборудования и его компонентов (высоковольтные линии, компоненты из цветных металлов и др.)  |
| $r_3$        | Установка взрывчатого устройства на ЛЧ МН  | $\rho_3$                 | Реализация террористического акта с целью нанесения материального, экологического и другого ущерба объекту топливно-энергетического комплекса   |

Далее, следуя [16], в качестве входных параметров математической модели принимаем параметры линейного объекта  $S$ , интенсивность инцидентов нарушения ФБ линейного объекта, характеристики проводимых контрольных мероприятий.

Важной характеристикой рассматриваемой модели является ее динамический характер, учитывающий суточные и сезонные колебания риска вдоль различных участков ЛЧ МН.

Расчет этой динамики основывается на априорном показателе интенсивности инцидентов нарушения ФБ и степени опасности для того или иного участка линейного объекта. Модель должна также учитывать информацию о мероприятиях по контролю защищенности линейного объекта, снижающих величину риска ФБ в местах их проведения на величину их рискоснижающего потенциала [4]. Выходным параметром модели управления рисками  $S$  является динамика пространственно-временного распределения величины риска ФБ ЛЧ МН. Аналогичные подходы по использованию про-

странственно-временного распределения вероятности событий применяются в информационной безопасности [18], экологии [19], криминалистике [20] и др.

Каждое рисковое событие имеет три основные характеристики:  $c_{i^R}$  – цену риска (оценку ущерба, который может быть нанесен событием риска),  $p_{i^R}$  – вероятность рискового события и величину риска  $w_{i^R}$ , рассчитываемую по формуле [4]

$$w_{i^R} = c_{i^R} \cdot p_{i^R}.$$

На основе входного параметра модели  $\lambda$  – периода повторяемости инцидентов нарушения физической безопасности линейного объекта – зададим границы области определения функции  $p_{i^R}$  во времени  $t \in \Delta t \in (t_{нач}, t_{кон})$ . Оценку величины риска для каждого события определим как функцию

$$w_{i^R}(t) = c_{i^R} \cdot p_{i^R}(t), \quad (1)$$

где  $w_{i^R}(t)$  – значение величины риска ФБ в момент времени  $t$ ;  $c_{i^R}$  – цена риска, т. е. оценка ущерба, который может быть нанесен событием риска;  $p_{i^R}(t)$  – значение вероятности реализации рискового события в момент времени  $t$ .

Определим линейный объект как отрезок числовой прямой  $S(x_{нач}, x_{кон})$ , где  $x_{нач}$  – начальная граничная точка отрезка,  $x_{кон}$  – конечная граничная точка отрезка. Зададим границы области определения функции  $p_{i^R}$  вдоль оси линейного объекта как  $x \in \Delta x \in (x_{нач}, x_{кон})$ . Следуя подходу авторов [12], добавим второй аргумент в формулу (1) и определим функцию  $w_{i^R}(x, t)$

$$w_{i^R}(x, t) = c_{i^R} \cdot p_{i^R}(x, t).$$

Рассмотрим рисковое событие как двумерную дискретную случайную величину, определенную на равных интервалах длиной  $h_t$  и  $h_x$ . Тогда интегральное значение риска на интервале  $\Delta t \times \Delta x$  будет определяться уравнением

$$\begin{aligned} w_{i^R}(\Delta x, \Delta t) &= c_{i^R} P_{i^R}(x, t) = \\ &= \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) = c_{i^R} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j), \end{aligned}$$

где  $h_x = \frac{x_{кон} - x_{нач}}{m}$ ,  $h_t = \frac{t_{кон} - t_{нач}}{n}$  – шаги сетки;  $n$  –

количество шагов сетки для  $\Delta t$ ;  $m$  – количество шагов сетки для  $\Delta x$ ;  $j \in J^M$  – множество индексов, определенных на интервале  $\Delta t$ ;  $i \in I^M$  – множество индексов, определенных на интервале  $\Delta x$ ;  $\bar{t}_j \in ((j-1)h_t, jh_t)$ ,  $\bar{x}_i \in ((i-1)h_x, ih_x)$  – интервалы;  $w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  – значение величины риска на интервале  $\bar{t}_j$ ,  $\bar{x}_i$ .

Значения  $w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  могут быть записаны в виде матрицы  $\|w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  (табл. 3).

В качестве допущения модели, значение цены риска линейного объекта считаем постоянной величиной, не зависящей от времени и ее конкретного расположения на линейном объекте. Для линейных объектов транспортной инфраструктуры цену риска  $c_{i^R}$  (величину ущерба) можно определить как обобщающий показатель некоторых частных зна-

чений ущерба физической безопасности ЛЧ МН для рискового события [2] по следующей формуле

$$c_{i^R} = c_{i^R_{пл}} + c_{i^R_{тр}} + c_{i^R_{бал}} + c_{i^R_{экол}},$$

где  $c_{i^R_{пл}}$  – финансовый ущерб, определяемый численностью погибших и пострадавших;  $c_{i^R_{тр}}$  – финансовый ущерб от кражи транспортируемого сырья и уменьшения грузопотока;  $c_{i^R_{бал}}$  – балансовая стоимость сооружения или стоимость восстановления;  $c_{i^R_{экол}}$  – стоимостное выражение ожидаемого экологического ущерба.

Таблица 3. Матрица распределения рисков  $\|w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$

| $\Delta t$  | $\Delta x$                      |     |                                 |     |                                 |
|-------------|---------------------------------|-----|---------------------------------|-----|---------------------------------|
|             | $\bar{x}_1$                     | ... | $\bar{x}_i$                     | ... | $\bar{x}_m$                     |
| $\bar{t}_1$ | $w_{i^R}(\bar{x}_1, \bar{t}_1)$ | ... | $w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_1)$ | ... | $w_{i^R}(\bar{x}_m, \bar{t}_1)$ |
| ...         | ...                             | ... | ...                             | ... | ...                             |
| $\bar{t}_j$ | $w_{i^R}(\bar{x}_1, \bar{t}_j)$ | ... | $w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$ | ... | $w_{i^R}(\bar{x}_m, \bar{t}_j)$ |
| ...         | ...                             | ... | ...                             | ... | ...                             |
| $\bar{t}_n$ | $w_{i^R}(\bar{x}_1, \bar{t}_n)$ | ... | $w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_n)$ | ... | $w_{i^R}(\bar{x}_m, \bar{t}_n)$ |

Определим матрицу распределения величины  $\|p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  (табл. 4), на основе которой можно вычислить  $\|w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$

$$\|w_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| = c_{i^R} \|p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|.$$

Таблица 4. Матрица распределения  $\|p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$

| $\Delta t$  | $\Delta x$                      |     |                                 |     |                                 |
|-------------|---------------------------------|-----|---------------------------------|-----|---------------------------------|
|             | $\bar{x}_1$                     | ... | $\bar{x}_i$                     | ... | $\bar{x}_m$                     |
| $\bar{t}_1$ | $p_{i^R}(\bar{x}_1, \bar{t}_1)$ | ... | $p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_1)$ | ... | $p_{i^R}(\bar{x}_m, \bar{t}_1)$ |
| ...         | ...                             | ... | ...                             | ... | ...                             |
| $\bar{t}_j$ | $p_{i^R}(\bar{x}_1, \bar{t}_j)$ | ... | $p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$ | ... | $p_{i^R}(\bar{x}_m, \bar{t}_j)$ |
| ...         | ...                             | ... | ...                             | ... | ...                             |
| $\bar{t}_n$ | $p_{i^R}(\bar{x}_1, \bar{t}_n)$ | ... | $p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_n)$ | ... | $p_{i^R}(\bar{x}_m, \bar{t}_n)$ |

Примем, что события  $p_{i^R}(\bar{t}_j)$  и  $p_{i^R}(\bar{x}_i)$  независимы, тогда

$$p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) = p_{i^R}(\bar{t}_j) \cdot p_{i^R}(\bar{x}_i).$$

Указанное допущение свидетельствует о том, что рисковое событие может произойти в любой момент времени  $\bar{t}_j$  на произвольном участке линейного объекта  $\bar{x}_i$  и корреляция между функциями вероятности  $p_{i^R}(\bar{t}_j)$  и  $p_{i^R}(\bar{x}_i)$  отсутствует. Соответственно, для вероятности справедливы формулы

$$p_{i^R}(\bar{t}_j) = \sum_{i=1}^m p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j), \quad p_{i^R}(\bar{x}_i) = \sum_{j=1}^n p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j).$$

По условию нормировки

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m p_{i^R}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) = \sum_{j=1}^n p_{i^R}(\bar{t}_j) = \sum_{j=1}^n p_{i^R}(\bar{x}_i) = 1. \quad (2)$$

Пусть в качестве допущения модели величина  $t$  имеет равномерное дискретное распределение. Тогда значение вероятности составляющей  $p_{i^*}(\bar{x}_i)$  системы случайных величин  $p_{i^*}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  будет определяться уравнением

$$p_{i^*}(\bar{t}_j) = \frac{1}{n}.$$

Вероятность составляющей  $p_{i^*}(\bar{x}_i)$  системы случайных величин  $p_{i^*}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  определим экспертным методом [15]. Для всех участков  $\bar{x}_i \in (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m)$  определим среднее значение вероятности реализации рисковомго события  $p_{i^*}(\bar{x}_{cp})$

$$p_{i^*}(\bar{x}_{cp}) = \frac{1}{m}.$$

Для того чтобы учесть факторы, влияющие на вероятность реализации угрозы на том или ином участке линейного объекта, введем нормирующие коэффициенты  $\xi_i$ , определяющие степень опасности конкретного участка ЛЧ МН

$$p_{i^*}(\bar{x}_i) = \xi_i \cdot p_{i^*}(\bar{x}_{cp}). \quad (3)$$

Для определения коэффициентов  $\xi_i$  в формуле (3) для каждого участка  $\bar{x}_i \in (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m)$  линейного объекта воспользуемся методом балльной оценки факторов [13, 21]. На первоначальном этапе определим группы факторов влияния  $Гр_a$  с весовыми коэффициентами  $\rho_a$ , определяющими вероятность их влияния на реализацию угрозы ФБ. В пределах каждой группы  $Гр_a$  определим факторы влияния в количестве  $B_a$ . Каждый фактор имеет буквенно-цифровое обозначение  $F_{ab}$ , где  $a$  – номер группы,  $b$  – номер фактора в группе. Относительный вклад фактора  $F_{ab}$  внутри своей группы учитывается с помощью весового коэффициента (доли)  $q_{ab}$ .

Расчет коэффициента  $\xi_i$  производился нами с использованием балльной оценочной системы, при которой каждому значению фактора  $F_{ab}$  ставится в соответствие определенное, назначаемое на основании расчета или экспертной оценки, количество баллов  $B_{ab}$  (по 10-балльной шкале), отражающее интенсивность его влияния. При рассмотрении конкретного  $i$ -го участка линейного объекта последовательно оценивается степень влияния каждого из факторов. Полученные для всех факторов влияния балльные оценки  $\{B_{ab}, a \in (1...A), b \in (1...B)\}$  подставляются в формулу

$$\xi_i = \frac{B_i}{B_{cp}},$$

где  $B_i$  – балльная оценка  $i$ -го участка линейного объекта, определяемая как:

$$B_i = \sum_{a=1}^A \sum_{b=1}^{B(a)} \rho_a \cdot q_{ab} \cdot B_{ab},$$

где  $B_{cp}$  – средняя балльная оценка линейного объекта (среднее арифметическое), полученная на основе балльной оценки каждого участка линейного объекта  $i \in (1...m)$ , а  $m$  – общее количество рассматриваемых участков линейного объекта.

В работе [15] приведены группы факторов, факторы и их веса для определения значения  $\xi_i$  типовой модели угроз ЛЧ МН. Факторы и веса для рассмотренных рисковомго событий идентичны факторам модели угроз ЛЧ МН, поскольку каждому рисковомго событию ставится в соответствие только одна угроза безопасности. Группы факторов и веса рисковомго событий представлены в табл. 5.

Таблица 5. Группы факторов влияния

| Обозначение и наименование группы факторов |   | Доля группы, $\rho_a$ |         |         |
|--|---|-----------------------|---------|---------|
|  |   | $r_1^s$               | $r_2^s$ | $r_3^s$ |
| $Гр_1$                                     | Предпосылки акта незаконного вмешательства                    | 0,20                  | 0,20    | 0,80    |
| $Гр_2$                                     | Реализация акта незаконного вмешательства                     | 0,40                  | 0,40    | 0,10    |
| $Гр_3$                                     | Извлечения выгоды в результате акта незаконного вмешательства | 0,40                  | 0,40    | 0,10    |

Факторы влияния и их весовые коэффициенты представлены в табл. 6.

Таблица 6. Факторы влияния

| Обозначение и наименование фактора влияния                         |   | Доля в группе $q_{ab}$ |         |         |
|--|---|------------------------|---------|---------|
|  |   | $r_1^s$                | $r_2^s$ | $r_3^s$ |
| Группа 1: Предпосылки незаконного вмешательства                    |   |                        |         |         |
| $F_{11}$   | Криминогенная обстановка  | 0,20                   | 0,30    | 0,70    |
| $F_{12}$   | Населенность прилегающих территорий   | 0,60                   | 0,40    | 0,20    |
| $F_{13}$   | Уровень занятости населения прилегающих территорий  | 0,20                   | 0,30    | 0,10    |
| Группа 2: Реализация незаконного вмешательства                     |   |                        |         |         |
| $F_{21}$   | Защищенность объекта  | 0,10                   | 0,10    | 0,60    |
| $F_{22}$   | Наличие подъездных путей  | 0,60                   | 0,60    | 0,10    |
| $F_{23}$   | Наличие специального оборудования, персонала и транспорта для реализации акта незаконного вмешательства | 0,30                   | 0,30    | 0,30    |
| Группа 3: Извлечения выгоды в результате незаконного вмешательства |   |                        |         |         |
| $F_{31}$   | Наличие в прилегающих территориях пунктов сбыта похищенной продукции                                    | 0,90                   | 0,80    | 0       |
| $F_{32}$   | Репутационные, экологические и политические последствия   | 0,10                   | 0,20    | 1       |

В качестве примера в табл. 7 приведены значения отдельных составляющих фактора  $F_{31}$  и соответствующие им балльные оценки  $B_{31}^{(m)}$ , где  $m$  – номер составляющей. Итоговая балльная оценка для данного фактора рассчитывается как сумма балльных оценок нижеприведенных пяти составляющих. Если сумма баллов превышает 10, то  $B_{31}=10$ .

В работе [22] предложен способ хранения информации о GPS траекториях движущихся объектов в виде двумерного пространственно-временного распределения в системах обработки неструктурированных данных. Следуя данному подходу и переходя от абсолютных GPS координат к относительному позиционированию на ЛЧ МН, представим данные о мероприятиях по обеспечению безопасности объекта  $S$  в виде следующего системного множества

$$M = \{m_{i^m}(t), k_{i^m}\},$$

где  $i^m \in I^m$  – множество индексов мероприятий;  $k_{i^m} \in K^m$  – множество типов мероприятий;  $m_{i^m}(t)$  – относительная координата мероприятия на ЛЧ МН.

Таблица 7. Балльная оценка фактора  $B_{31}$

| $m$ | Наименование составляющей $m$  | $B_{31}^{(m)}$ |
|-----|--|----------------|
| 1   | В районе пролегания участка нефтепровода находятся потребители, использующие нефть в качестве топлива (малые котельные, теплицы, хлебозаводы, асфальтобитумные заводы и др.) | 5              |
| 2   | В районе пролегания участка нефтепровода находятся нелегальные нефтеперерабатывающие заводы  | 10             |
| 3   | В районе пролегания участка нефтепровода находятся частные малые нефтеперерабатывающие заводы  | 7              |
| 4   | В районе пролегания участка нефтепровода находятся крупные нефтеперерабатывающие заводы  | 2              |
| 5   | В районе пролегания участка нефтепровода осуществляют предпринимательскую деятельность юридические лица, занимающиеся торговлей нефтепродуктами                              | 3              |

Функция  $m_{i^m}: t \rightarrow x \rightarrow x_{i^m}$  является таблично заданной (табл. 8).

Таблица 8. Значения функции  $m_{i^m}(t)$

| $t$          | $t_1^{i^m}$ | $t_2^{i^m}$ | ... | ... | $t_z^{i^m}$ | ... | ... | $t_{i^m}^{i^m}$ |
|--------------|-------------|-------------|-----|-----|-------------|-----|-----|-----------------|
| $m_{i^m}(t)$ | $x_1^{i^m}$ | $x_2^{i^m}$ | ... | ... | $x_z^{i^m}$ | ... | ... | $x_{i^m}^{i^m}$ |

Функция  $m_{i^m}(t)$  представляет собой траекторию мероприятия во времени и пространстве линейного объекта, а множество  $z \in (1 \dots l_{i^m})$  представляет собой индексы координат мероприятия. В качестве допущения определим функцию  $m_{i^m}(t)$  как непрерывную.

Таким образом, каждому мероприятию будут соответствовать дискретные значения  $p_{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  в области определения  $\Delta x \times \Delta t$  (табл. 2). Для вычисления промежуточных значений  $(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  для каждого мероприятия  $m_{i^m}(t)$  значение функции  $m_{i^m}(t)$  аппроксимируем в виде непрерывной кусочно-линейной функции, построенной по значениям функции в двух соседних точках

$$m_{i^m}(t) = \begin{cases} \frac{(t - t_1^{i^m})(x_2^{i^m} - x_1^{i^m})}{(t_2^{i^m} - t_1^{i^m})} + x_1^{i^m}, & t_1^{i^m} < t < t_2^{i^m} \\ \dots \\ \frac{(t - t_z^{i^m})(x_{z+1}^{i^m} - x_z^{i^m})}{(t_{z+1}^{i^m} - t_z^{i^m})} + x_z^{i^m}, & t_z^{i^m} < t < t_{z+1}^{i^m} \\ \dots \\ \frac{(t - t_{n_M-1}^{i^m})(x_{n_M}^{i^m} - x_{n_M-1}^{i^m})}{(t_{n_M}^{i^m} - t_{n_M-1}^{i^m})} + x_{n_M-1}^{i^m}, & t_{n_M-1}^{i^m} < t < t_{n_M}^{i^m} \end{cases}$$

Тогда каждое контрольное мероприятие в каждой точке его проведения снижает вероятность рискового события до момента предыдущего мероприятия на величину

$$p_{i^m}^{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) = p_{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) \cdot (1 - \sigma_{k_{i^m}}),$$

$$\bar{x}_i = x_z^{i^m}, \bar{t}_j \in (t_{z_{\text{пред}}}^{i^m}, t_z^{i^m}),$$

где  $t_z^{\text{пред}}$  – момент времени проведения предыдущего мероприятия;  $(t_{z_{\text{пред}}}^{i^m}, t_z^{i^m})$  – интервал времени с момента проведения предыдущего мероприятия;  $\sigma_{k_{i^m}} \in (0, 1)$  – коэффициент эффективности снижения рискового события для типа мероприятия  $k_{i^m}$ .

Коэффициент  $\sigma_{k_{i^m}}$  определим с применением методов экспертного оценивания путем непосредственного оценивания эффективности снижения рискового события для мероприятия типа  $k_{i^m}$ . Чем выше коэффициент  $\sigma_{k_{i^m}}$ , тем эффективнее мероприятие снижает величину риска на временном интервале до момента проведения предыдущего мероприятия, поскольку в результате контрольного мероприятия мы получаем информацию об отсутствии реализованных рисковых событий на обследуемом участке.

Общий рискоснижающий потенциал мероприятия  $n_{i^m}$  можно вычислить по формуле

$$u_{i^m}^{i^m} = \sum p_{i^m}^{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j), \bar{x}_i = x_z^{i^m}, \bar{t}_j \in (t_{z_{\text{пред}}}^{i^m}, t_z^{i^m}).$$

С учетом основного свойства закона распределения (2) значение вероятности рискового события перераспределится в «будущие» участки времени и на «соседние» участки линейного объекта

$$p_{i^m}^{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) = \frac{u_{i^m}^{i^m}}{\sqrt{t_z^{i^m} \dots t_j^{i^m}}}, \bar{x}_i = x_z^{i^m}, \bar{t}_j \in (t_z^{i^m}, t_n^{i^m}),$$

$$p_{i^m}^{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) = \frac{p_{i^m}^{i^m}(x_z^{i^m}, t_z^{i^m})}{\sqrt{x_1 \dots x_{z-1}^{i^m} x_{z+1}^{i^m} \dots x_m^{i^m}}},$$

$$\bar{x}_i \in (x_1 \dots x_{z-1}^{i^m}, x_{z+1}^{i^m} \dots x_m^{i^m}), \bar{t}_j = t_z^{i^m}.$$

Каждое мероприятие снижает отдельные элементы общей матрицы распределения  $\|p_{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  на величину  $\|p_{i^m}^{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  и повышает другие элементы матрицы  $\|p_{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  на величину  $\|p_{i^m}^{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ . Для заданной координаты  $\bar{x}_z^{i^m}, \bar{t}_z^{i^m}$  мероприятия  $m_{i^m}(t)$  может быть матрица корректировки значения вероятности  $\|p_{i^m}^{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  на всей области определения функции  $p_{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  (табл. 9).

Для оценки рискоснижающего потенциала множества мероприятий  $M = \{m_{i^m}(t), k_{i^m}\}$  необходимо осуществить последовательный расчет значений  $\|p_{i^m}^{i^m}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  для каждого  $\bar{x}_i = m_{i^m}(t) = x_z^{i^m}$ , упорядочивая множество значений  $\bar{t}_z^{i^m}$  всех мероприятий

по возрастанию, для того чтобы достоверно определить дату проведения предыдущего мероприятия.

**Таблица 9.** Матрица корректировки значения вероятности  $\|p_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ 

| $\Delta t$                | $\Delta x$                            |                                       |     |   |     |  |
|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----|---|-----|--|
|                           | $\bar{x}_1^{iM}$                      | $\bar{x}_2^{iM}$                      | ... | $\bar{x}_i^{iM}$                        | ... | $\bar{x}_{n_{iM}}^{iM}$                      |
| $\bar{t}_1$               | 0                                     | 0                                     | ... | 0                                       | ... | 0  |
| ...                       | ...                                   | ...                                   | ... | ...                                     | ... | ...  |
| $\bar{t}_j^{пред}$        | 0                                     | 0                                     | ... | $p_{iR}(x_i^{iM}, t_j^{пред})$          | ... | 0  |
| ...                       | ...                                   | ...                                   | ... | ...                                     | ... | ...  |
| $\bar{t}_{n_{iM}}^{iM}$   | $p_{iR}''(x_1^{iM}, t_{n_{iM}}^{iM})$ | $p_{iR}''(x_2^{iM}, t_{n_{iM}}^{iM})$ | ... | $p_{iR}'(x_i^{iM}, t_{n_{iM}}^{iM})$    | ... | $p_{iR}''(x_{n_{iM}}^{iM}, t_{n_{iM}}^{iM})$ |
| $\bar{t}_{n_{iM}+1}^{iM}$ | 0                                     | 0                                     | ... | $p_{iR}''(x_i^{iM}, t_{n_{iM}+1}^{iM})$ | ... | 0  |
| ...                       | ...                                   | ...                                   | ... | ...                                     | ... | ...  |
| $\bar{t}_n$               | 0                                     | 0                                     | 0   | $p_{iR}''(x_i, t_j)$                    | 0   | 0  |

Если траектории нескольких мероприятий проходят через точку  $(x_z^{iM}, t_z^{iM})$ , то для мероприятия с наибольшим  $\sigma_{k_{iM}}(t_{z_{пред}}^{iM}, t_z^{iM}) > 0$ , для остальных мероприятий  $\bar{t}_{z_{пред}}^{iM} = \bar{t}_z^{iM}$ . Таким образом, при расчете рискообразующего потенциала учитывается наиболее эффективное мероприятие из всех проведенных.

Множество мероприятий  $M$  образуют совокупную матрицу корректирующих мероприятий  $\|p_{iR}^M(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ , на основе которой возможно определить результирующее значение риска матрицы распределения рисков  $\|w_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  как набора арифметических операций с матрицами:

$$\begin{aligned} \|w_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| &= c_{iR} \cdot \|p_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| = \\ &= c_{iR} (\|p_{iR}^M(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| - \|p_{iR}^M(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|) = \\ &= c_{iR} \left( \|p_{iR}^M(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| - \sum_{i^M=1}^I \sum_{z=1}^{I^M} \|p_{iR}^M(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\| \right). \end{aligned}$$

Результирующая матрица  $\|w_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  определяет динамическое, пространственно-временное распределение риска ФБ. Матрица является источником формирования дополнительных интегральных количественных показателей, участвующих в процессе поддержки принятия решений по распределению имеющихся ресурсов для снижения риска.

В качестве примера такого показателя введем понятие накопленного риска  $W_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$ , описывающего уровень риска в монетарном выражении для участка линейного объекта  $\bar{x}_i$  на момент времени  $\bar{t}_j$  как

$$\begin{aligned} W_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) &= w_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \Delta t') = \\ &= \sum_{j'=1}^j w_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \bar{t}_{j'}) = c_{iR} \sum_{j'=1}^j p_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_{j'}), \end{aligned}$$

где  $\Delta t' \in (t_{нач}, t_j)$  – интервал времени для расчета накопленного риска.

Введенный выше показатель  $W_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  основан на накопленной вероятности события риска, отражает финансовую составляющую риска и может применяться при обосновании затрат по проведению контрольных мероприятий, а также для оценки необходимого количества денежных средств для обеспечения безопасности линейных объектов [13].

Также введем понятие уровня риска  $E_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$ , выраженного в долях для участка линейного объекта  $\bar{x}_i$  на момент времени  $\bar{t}_j$  как:

$$\begin{aligned} E_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j) &= \frac{w_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \Delta t')}{w_{iR}(\bar{x}_i, \Delta t')} = \\ &= \frac{\sum_{j'=1}^j w_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \bar{t}_{j'})}{\sum_{j'=1}^j w_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_{j'})} = \frac{\sum_{j'=1}^j p_{iR}^{pe3}(\bar{x}_i, \bar{t}_{j'})}{\sum_{j'=1}^j p_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_{j'})}, \end{aligned}$$

$E_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  позволяет оценить динамику риска произвольного участка линейного объекта с учетом проведенных мероприятий. Показатель можно выразить в процентном отношении.

Значения  $W_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  и  $E_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$ , определенные на интервале  $\Delta t \times \Delta x$ , могут быть также определены в виде матриц  $\|W_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$  и  $\|E_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)\|$ .

Показатели  $W_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  и  $E_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$ , на наш взгляд, являются альтернативами действующим показателям эффективности процесса анализа и планирования мероприятий для поддержки заданного уровня защищенности линейного объекта, а именно:

- количество мероприятий на участке  $\bar{x}_i$  на момент времени  $\bar{t}_j$ ;
- количество дней с последнего мероприятия на участке  $\bar{x}_i$  на момент времени  $\bar{t}_j$ .

Показатели  $W_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  и  $E_{iR}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  позволяют более эффективно решать заключительную задачу

процесса оценки рисков – сравнительную оценку риска, за счет следующих преимуществ:

- учитываются различные степени опасности для участков линейного объекта  $\bar{x}_i$  со стороны злоумышленников;
- учитывается различная степень эффективности множества типов контрольных мероприятий  $\{k_{ip}\}$ .

В качестве примера использования модели рассмотрим результаты расчета показателей  $W_{ip}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  и  $E_{ip}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  для одного из МН Томской области. При этом будем использовать следующие входные параметры:

- $\lambda$  – 1 инцидент/год,  $t_{нач}$  – 01.01.2013,  $t_{кон}$  – 31.12.2013;
  - $S$  – МН «Александровское–Анжеро-Судженск» ( $x_{нач}=0,0$ ;  $x_{кон}=818,0$  км);
  - $M$  – данные о мероприятиях, проведенных экипажем службы безопасности (СБ) ОАО «Центрсибнефтепровод» за смену с 01.01.2013 20:07 по 02.01.2013 2:42 (табл. 10).
- В качестве внутренних параметров определим:
- $C_{ip}=30$  млн р.;
  - обследование на автомобиле  $k=0,3$ ; пешее обследование  $k=0,4$ ; обследование подъездных путей к МН  $k=0,1$ ;
  - $h_i=1$  мин и  $h_x=100$  м;
  - $\xi_i=1$ .

Аппроксимированный график выходных параметров модели  $W_{ip}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  и  $E_{ip}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  для  $\bar{x}_i \in (394, \dots, 440)$  км и  $\bar{t}_j = 02.01.2013$  2:42 представлен на рис. 1. На рисунке представлена зависимость влияния информации о проведенных контрольных мероприятиях на выходной параметр модели – величину риска ФБ.

На рис. 2, 3 представлены графики интегральных значений  $W_{ip}(\Delta x^i, \bar{t}_j)$  и  $E_{ip}(\Delta x^i, \bar{t}_j)$  для участка

$\Delta x^i$  МН «Александровское–Анжеро-Судженск» длиной 400 км при  $\Delta t=1$  год. Начальная и конечная координаты участка не указываются, поскольку реальные значения величин с привязкой к конкретному участку составляют коммерческую тайну ОАО «Центрсибнефтепровод».

На рис. 4, 5 представлены трехмерные графики распределения величин  $W_{ip}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  и  $E_{ip}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  для аналогичного участка  $\Delta x^i$  МН «Александровское–Анжеро-Судженск» длиной 400 км при  $\bar{t}_j \in \Delta t$ ,  $\Delta t=1$  год. Графики указывают на слабые и незащищенные места ЛЧ МН и обеспечивают лиц, осуществляющих принятие решений [10], наглядным представлением о защищенности ЛЧ МН во времени и пространстве.

Для построения указанных графиков использовался трехмерный графопостроитель «contourf» пакета Matlab, в котором топология поверхности массивов  $W_{ip}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  и  $E_{ip}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  в трехмерном пространстве изображалась в виде цветового набора двумерных линий постоянного уровня. При этом наглядную информацию об изменении функции дает заливка прямоугольника на плоскости XY (участок ЛЧ МН/время) цветом, зависящим от значения функции в точках плоскости (значение риска/уровня риска). Более светлые области графика плоскости соответствуют областям с наибольшим значением риска (уровня риска) и выделяют наиболее опасные места (во времени для участка ЛЧ МН), для которых вероятность появления рискованного события наиболее велика. Темные участки выделяют наименее опасные места, где за счет информации, полученной в ходе проведения контрольных мероприятий, вероятность появления рискованного события уменьшается.

Таблица 10. Мероприятия, проведенные экипажем СБ за смену

| Время начала мероприятия, $t_1^{in}$ | Время окончания мероприятия, $t_2^{in}$ | Начальный участок осмотра, $x_1^{in}$ | Конечный участок осмотра, $x_2^{in}$ | Тип мероприятия, $k_{ip}$          |
|--------------------------------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 01.01.2013 20:07                     | 01.01.2013 20:37                        | 394                                   | 398,4                                | Обследование на автомобиле         |
| 01.01.2013 20:37                     | 01.01.2013 20:52                        | 398,5                                 | 398,4                                | Пешее обследование                 |
| 01.01.2013 20:52                     | 01.01.2013 21:19                        | 398,5                                 | 400,4                                | Обследование на автомобиле         |
| 01.01.2013 21:19                     | 01.01.2013 21:53                        | 400,2                                 | 400,4                                | Пешее обследование                 |
| 01.01.2013 21:53                     | 01.01.2013 22:11                        | 408,9                                 | 400,4                                | Обследование на автомобиле         |
| 01.01.2013 22:11                     | 01.01.2013 22:43                        | 408,9                                 | 409                                  | Пешее обследование                 |
| 01.01.2013 22:43                     | 01.01.2013 22:54                        | 413,1                                 | 409                                  | Обследование на автомобиле         |
| 01.01.2013 22:54                     | 01.01.2013 23:19                        | 413,1                                 | 413,2                                | Пешее обследование                 |
| 01.01.2013 23:19                     | 01.01.2013 23:42                        | 416,4                                 | 413,2                                | Обследование на автомобиле         |
| 01.01.2013 23:42                     | 01.01.2013 23:58                        | 414,4                                 | 414,6                                | Пешее обследование                 |
| 01.01.2013 23:58                     | 02.01.2013 0:12                         | 416,6                                 | 418,2                                | Обследование на автомобиле         |
| 02.01.2013 0:12                      | 02.01.2013 0:27                         | 418,3                                 | 418,2                                | Пешее обследование                 |
| 02.01.2013 0:27                      | 02.01.2013 0:58                         | 418,3                                 | 427,9                                | Обследование на автомобиле         |
| 02.01.2013 0:58                      | 02.01.2013 1:18                         | 428                                   | 427,9                                | Пешее обследование                 |
| 02.01.2013 1:18                      | 02.01.2013 1:34                         | 428                                   | 431                                  | Обследование на автомобиле         |
| 02.01.2013 1:34                      | 02.01.2013 1:43                         | 431                                   | 431                                  | Обследование подъездных путей к МН |
| 02.01.2013 2:24                      | 02.01.2013 2:35                         | 435                                   | 435,2                                | Пешее обследование                 |
| 02.01.2013 1:52                      | 02.01.2013 2:03                         | 436,2                                 | 436,2                                | Обследование подъездных путей к МН |
| 02.01.2013 2:03                      | 02.01.2013 2:24                         | 435                                   | 437,4                                | Обследование на автомобиле         |
| 02.01.2013 2:35                      | 02.01.2013 2:42                         | 437,4                                 | 437,5                                | Пешее обследование                 |

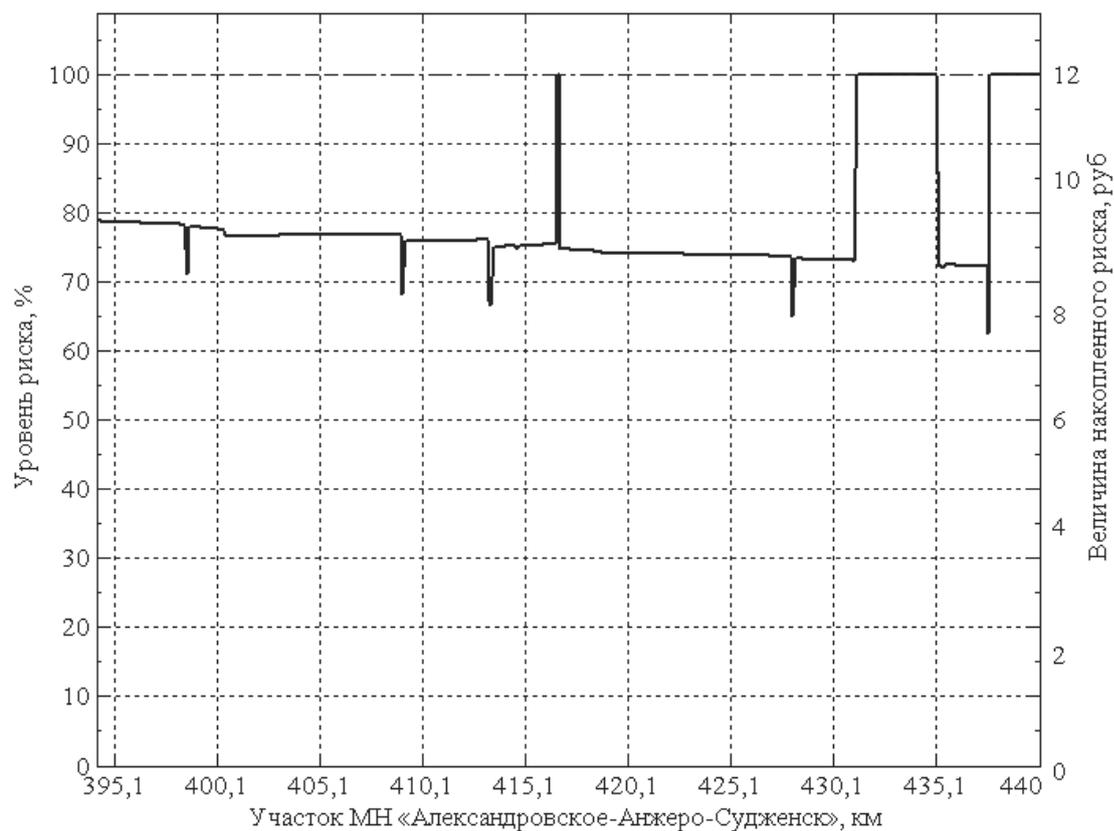


Рис. 1. Значение уровня риска и накопленного риска для участка МН 394–440 км

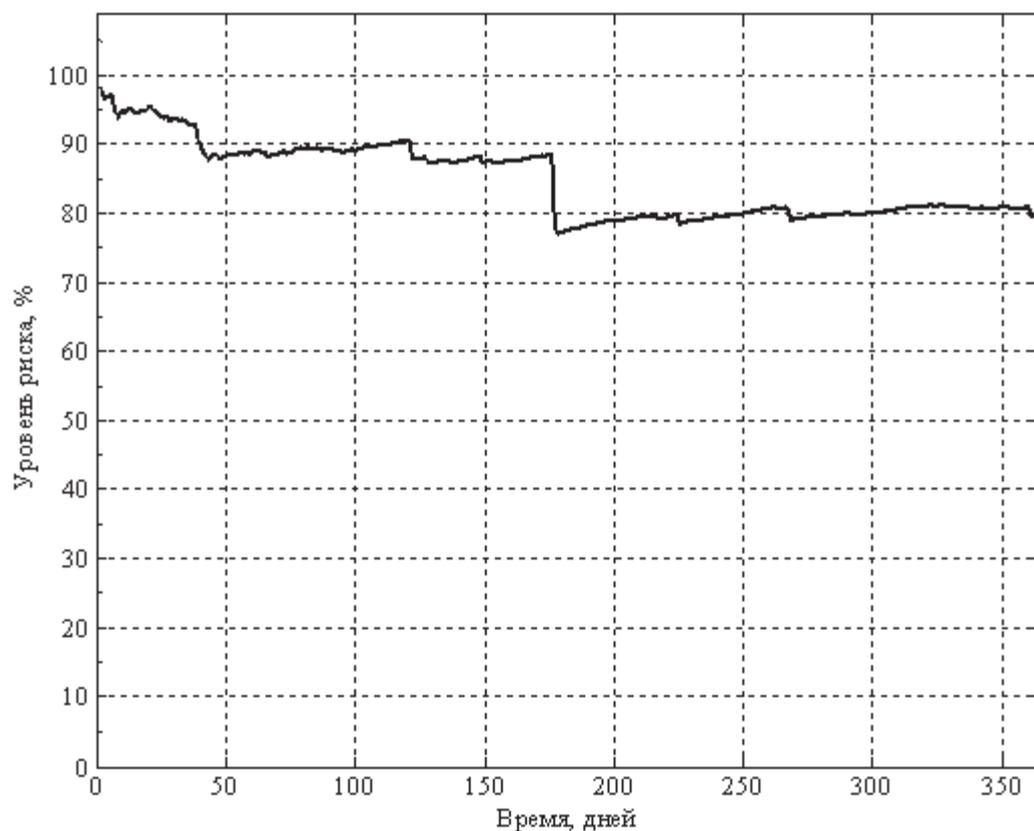


Рис. 2. Значение уровня риска на участке МН длиной 400 км в течение года

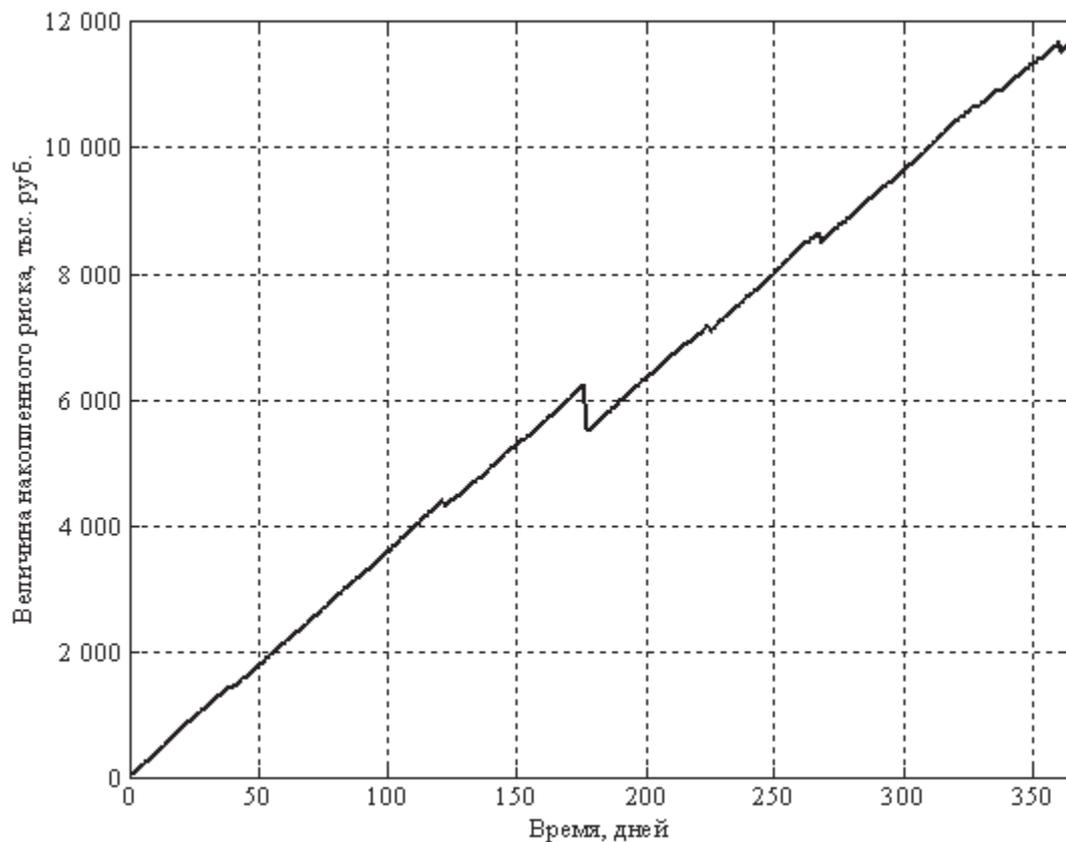


Рис. 3. Значение накопленного риска на участке МН длиной 400 км в течение года

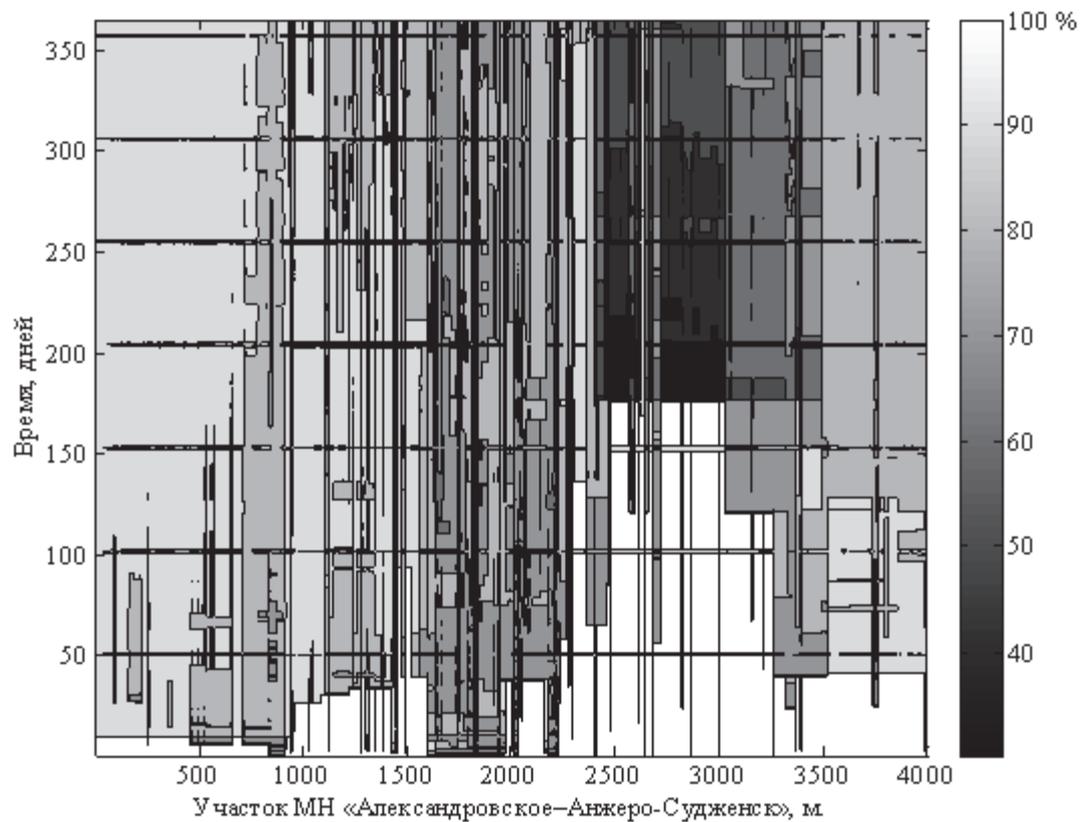


Рис. 4. Распределение уровня риска на участке МН длиной 400 км

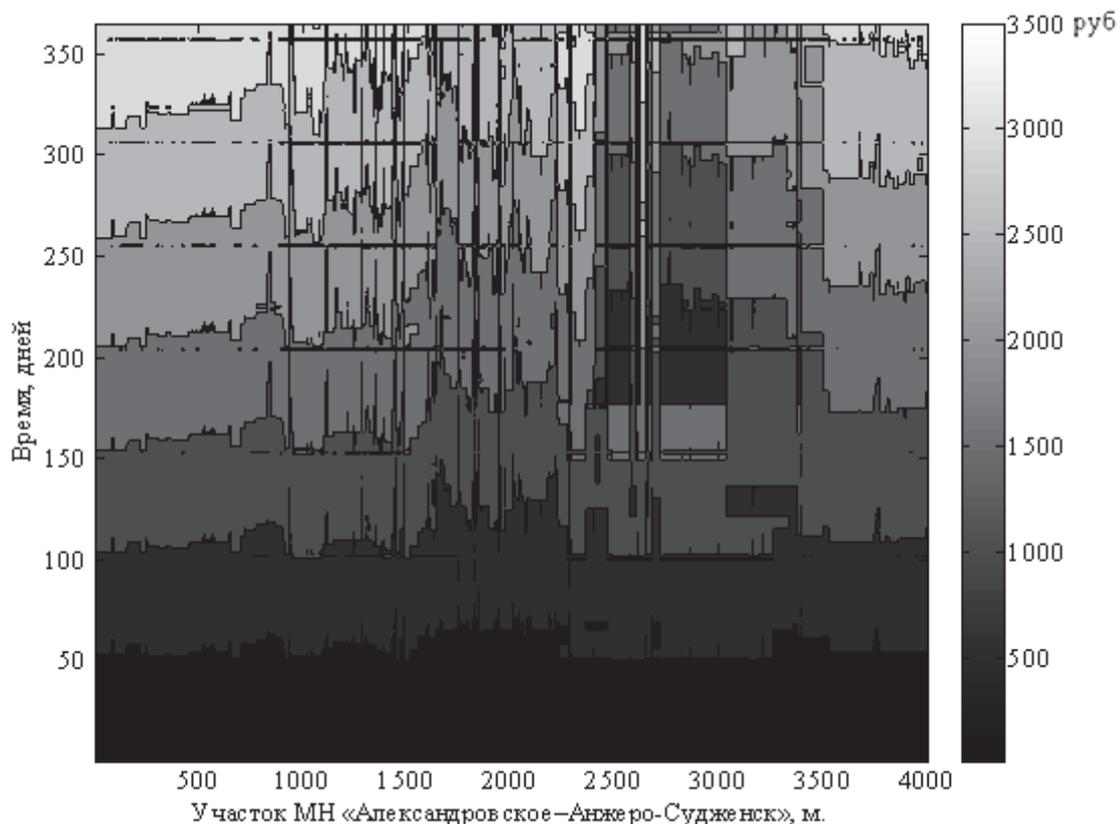


Рис. 5. Распределение накопленного риска на участке МН длиной 400 км

В ОАО «Центрсибнефтепровод» происходит внедрение автоматизированной системы (АС), реализующей указанную математическую модель по оценке величины риска физической безопасности. Среди специализированных АС схожей направленности можно выделить разработки зарубежных компаний по управлению рисками эксплуатации МН [23–25].

Первая очередь автоматизированной системы введена в промышленную эксплуатацию и используется во всех подразделениях СБ ОАО «Центрсибнефтепровод». АС позволяет осуществлять централизованный сбор и хранение данных для автоматизированного формирования входных параметров математической модели. На сегодняшний момент в АС зарегистрирована информация о 19 тыс. обследованных участках МН «Самотлор–Александровское», «Александровское–Анжеро-Судженск», «Игольско-Таловое–Парабель». Эти данные в совокупности образуют основной параметр модели – множество контрольных мероприятий  $M$ . Проведено категорирование МН, на основе которого рассчитаны коэффициенты  $\xi_i$ , произведена оценка коэффициентов  $k_{r_i}$ .

Работы по внедрению второй очереди АС находятся на стадии разработки технического проекта. Завершение работ по внедрению АС позволит интегрировать разработанную математическую модель в производственные процессы по охране ЛЧ МН ОАО «Центрсибнефтепровод». Использование ко-

личественных показателей  $W_{i^*}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  и  $E_{i^*}(\bar{x}_i, \bar{t}_j)$  позволит обеспечить руководящий персонал дополнительной информацией для принятия более эффективных управленческих решений при планировании мероприятий по охране ЛЧ МН.

#### Выводы

На основе методики оценки рисков в иерархических структурах критически важных объектов [4], с учетом отдельных элементов методик по управлению эксплуатационными рисками МН [9–13], авторами предложена методика оценки риска ФБ для пространственно-протяженных объектов типа ЛЧ МН, реализующая принципы ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска». В рамках первого этапа оценки проведена идентификация рисков ФБ ЛЧ МН, предложен возможный вариант перечня источников риска и соответствующих им рисков событий. Для проведения дальнейших этапов по анализу и сравнительной оценке риска разработана математическая модель оценки рисков для пространственно-распределенных линейных объектов ТЭК типа ЛЧ МН.

Модель позволяет рассчитать пространственно-временное распределение величины риска ФБ, которое основывается на предположении о двумерном дискретном случайном распределении вероятности рисков события. Учитывается разная степень защищенности участков МН путем использо-

вания метода балльной оценки факторов, влияющих на степень опасности участков МН [15]. Результирующее значение величины риска ФБ определяется на основе данных о проведенных мероприятиях по контролю защищенности линейного объекта. Модель учитывает различную степень эффективности множества типов мероприятий.

В качестве модельной иллюстрации произведен расчет выходных параметров модели  $W_i(x_i, \bar{t}_i)$  и

$E_i(\bar{x}_i, \bar{t}_i)$  для различных участков МН «Александровское–Анжеро-Судженск» при входных параметрах модели, основанных на реальных данных и произвольных значениях внутренних параметров (реальные значения составляют коммерческую тайну ОАО «Центрсибнефтепровод»).

*Выражаем благодарность Геннадию Наумовичу Глазову, ведущему научному сотруднику ЗАО «НПФ «Микран», за полезные консультации при подготовке статьи.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон Российской Федерации от 21 июля 2011 г. № 256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса» // Российская газета – издание Правительства Российской Федерации, официальный публикатор документов. 2011. URL: <http://www.rg.ru/2011/07/26/tek-dok.html> (дата обращения: 28.01.2014).
2. Кононов А.А., Стиславский А.Б., Цыгичко В.Н. Управление рисками нарушения транспортной безопасности. – М.: АС-Траст, 2008. – 210 с.
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31000–2010. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартиформ, 2011. – 28 с.
4. Оценка рисков в иерархических структурах критически важных объектов / А.А. Кононов, К.В. Черныш, Д.С. Гуревич, А.К. Поликарпов // Труды ИСА РАН / под ред. Д.С. Черешкина. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – Т. 52. – С. 5–15.
5. Управление кибербезопасностью автоматизированных информационных систем / В.Н. Бекетов, А.А. Кононов, С.Н. Осипов, А.А. Фобьянчук // Труды ИСА РАН. – 2011. – Т. 61. – С. 8–13.
6. Цыгичко В.Н., Кононов А.А., Поликарпов А.К. Концепция системы управления рисками нарушения таможенного законодательства // Труды ИСА РАН. – 2011. – Т. 31. – С. 21–41.
7. Стиславский А.Б., Кононов А.А. Автоматизированная система управления безопасностью объектов транспортной инфраструктуры // Управление рисками и безопасностью: Труды ИСА РАН. – М.: ЛЕНАНД, 2009. – Т. 31. – С. 52–73.
8. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. Ч. 4. Научно-методическая база анализа риска и безопасности / науч. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГОФ «Знание», 2007. – 864 с.
9. D’Atri M.F., Rodriguez D., Garcia-Martinez R. Improving pipeline risk models by using data mining techniques // 24<sup>th</sup> World Gas Conference. – Buenos Aires, 2009. URL: <http://www.igu.org/html/wgc2009/papers/docs/wgcFinal00663.pdf> (дата обращения: 28.01.2014).
10. Selva R., Eng C., Mech F.I. Risk Based Inspection (RBI) Best Practice: The Technical Specification for Ensuring Successful Implementation // 13<sup>th</sup> International Conference on Pressure Vessel & Piping Technology. – London, 2012. URL: [http://www.ppsimtech.com/downloads/risk\\_based\\_inspection\\_best\\_practice\\_the\\_technical\\_specification\\_ron\\_selva\\_pp\\_simtech\\_keynote\\_paper-1\\_13th\\_icpvt\\_2012\\_london.pdf](http://www.ppsimtech.com/downloads/risk_based_inspection_best_practice_the_technical_specification_ron_selva_pp_simtech_keynote_paper-1_13th_icpvt_2012_london.pdf) (дата обращения: 28.01.2014).
11. Selvik J.T., Scarf P., Aven T. An extended methodology for risk based inspection planning // Reliability: Theory & Applications. – 2011. – № 20. URL: [http://gnedenko-forum.org/Journal/2011/012011/RTA\\_1\\_2011-12.pdf](http://gnedenko-forum.org/Journal/2011/012011/RTA_1_2011-12.pdf) (дата обращения: 28.01.2014).
12. Оценка риска аварий на магистральных нефтепроводах КТК-Р и БТС / Ю.А. Дадонов и др. // Управление промышленной безопасностью. – 2002. URL: [http://programs.safety.ru/BTP/2002\\_6/02\\_06\\_2-6.pdf](http://programs.safety.ru/BTP/2002_6/02_06_2-6.pdf) (дата обращения: 28.01.2014).
13. Анализ риска магистральных нефтепроводов при обосновании проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований безопасности / Лисанов М.В. и др. // Безопасность Труда в Промышленности. Анализ рисков. – 2010. – № 3. URL: [http://www.safety.ru/downloads/publik\\_s\\_analiz\\_riska/4.6.%20%D0%9B%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2.PDF](http://www.safety.ru/downloads/publik_s_analiz_riska/4.6.%20%D0%9B%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2.PDF) (дата обращения: 28.01.2014).
14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. – М.: Стандартиформ, 2011. – 74 с.
15. Кукало И.А. Модель угроз системы физической защиты линейной части магистрального нефтепровода // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 5. – С. 37–41.
16. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. – М.: КНО-РУС, 2010. – 224 с.
17. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. № 87 г. Москва // Российская газета – издание Правительства Российской Федерации, официальный публикатор документов. 2014. URL: <http://www.rg.ru/2011/07/26/tek-dok.html> (дата обращения: 28.01.2014).
18. Jiang G., Cybenko G. Fellow Temporal and Spatial Distributed Event Correlation for Network Security // Proceeding of the 2004 American Control Conference. – Boston, 2004. URL: [http://www.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/acc04/Papers/0173\\_WeM11.4.pdf](http://www.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/acc04/Papers/0173_WeM11.4.pdf) (дата обращения: 28.01.2014).
19. Fink D., Hochachka W.M. Spatiotemporal exploratory models for broad-scale survey data // The Ecological Society of America. – 2010. – № 20. URL: <http://faculty.bsbc.cornell.edu/~hooker/STEM.pdf> (дата обращения: 28.01.2014).
20. Wang X., Brown D.E. The spatio-temporal modeling for criminal incidents // Security Informatics. 2012. URL: <http://www.security-informatics.com/content/1/1/2> (дата обращения: 28.01.2014).
21. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ рисков и управление безопасностью: методические рекомендации. / науч. руковод. К.В. Фролов. – М.: МГОФ «Знание», 2008. – 672 с.
22. Querying Uncertain Spatio-Temporal Data / T. Emrich, H.-P. Kriegel, N. Mamoulis, M. Renz, A. Zuffe. URL: [http://i.cs.hku.hk/~nikos/ICDE12\\_UncertainST.pdf](http://i.cs.hku.hk/~nikos/ICDE12_UncertainST.pdf) (дата обращения: 28.01.2014).
23. The Synergi Pipeline software. URL: [http://www.dnv.com/services/software/products/synergi/synergi\\_pipeline/index.asp](http://www.dnv.com/services/software/products/synergi/synergi_pipeline/index.asp) (дата обращения: 28.01.2014).
24. Pipeline Risk Controller Version 2.0 for Windows. URL: <http://www.gulfpub.com/product.asp?ProductID=2428> (дата обращения: 28.01.2014).
25. The Multi-Analytic Risk Visualization. URL: [http://www.dnv.com/moreondnv/research\\_innovation/programmes/materials/sensors/marv.asp](http://www.dnv.com/moreondnv/research_innovation/programmes/materials/sensors/marv.asp) (дата обращения: 28.01.2014).

Поступила 03.02.2014 г.

## RISK ASSESSMENT OF LINEAR PART PHYSICAL SAFETY IN THE MAIN OIL PIPELINE

Ivan A. Kukalo,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: i@kukalo.ru

Sergey N. Grivtsov,

JSC «TsentrSibnefteprovod», 24, Naberezhnaya Reki Ushayki Street,  
Tomsk, 634050, Russia. E-mail: GrivtsovSN@tom.transneft.ru

Relevance of the work is caused by need to protect the objects of the fuel and energy complex from illegal intervention.

**The main aim of the study** is to generalize and to develop a risk assessment technique in hierarchical structures of crucial objects for spatial distributed linear objects of energy industry of the type linear part of the main oil pipeline.

**The methods used in the study:** Mathematical modeling of risk event probability distribution, expert assessment by the Delfi method, ranging method, direct assessment method, numerical integration of risk two-dimensional function in time and space, interpolation of function of the held event trajectory.

**The results:** The authors have proposed the technique for assessing physical safety risk for linear part of the main oil pipeline, implementing GOST P ISO 31000–2010 concept. Physical safety risks of linear part of the main oil pipeline were identify; the mathematical model for assessing risks for spatial spread linear objects of energy industry like linear part of the main oil pipeline was developed to carry out the analysis and comparative assessment of risk. The model allows calculating existential distribution of physical safety risk dimension which is based on the assumption of two-dimensional discrete casual distribution of risk event probability. Resultant value of size of physical safety risk dimension is defined on the basis of data on the held events on control of linear object security. The authors calculated the output parameters of the model for the main pipeline «Aleksandrovsky–Anzhero-Sudzhensky» considering input parameters provided by JSC «TsentrSibnefteprovod».

**Key words:**

Risk assessment, oil pipeline, physical safety, matrix of risk distribution, spatiotemporal distribution, cumulative risk, level of risk.

## REFERENCES

1. *Federalny zakon Rossiyskoy Federatsii ot 21 iyulya 2011 g. № 256-FZ «O bezopasnosti obektov toplivno-energeticheskogo kompleksa»* [Federal Law of 21 July 2011 № 256-FZ «On the safety of the fuel and energy complex»]. Available at: <http://www.rg.ru/2011/07/26/tek-dok.html> (accessed 28 January 2014).
2. Kononov A.A. *Upravlenie riskami narusheniya transportnoy bezopasnosti* [Risk management for transport safety violations]. Moscow, AS-Trast Publ., 2008. 210 p.
3. *GOST R ISO/MEK 31000–2010. Menedzhment riska. Printsipy i rukovodstvo* [State Standard 31000–2010. Risk management. Principles and Guidelines on Implementation]. Moscow, Standartinform, 2010. 28 p.
4. Kononov A.A., Chernysh K.V., Gurevich D.S., Polikarpov A.K. Otsenka riskov v ierarkhicheskikh strukturakh kriticheskikh vazhnykh obektov [Risk assessment in hierarchical structures of critical facilities]. *Trudy ISA RAN*, 2010, no. 52, pp. 5–15.
5. Beketov V.N., Kononov A.A., Osipov S.N., Fobyanchuk A.A. Upravlenie kiberbezopasnostyu avtomatizirovannykh informatsionnykh sistem [Cybersecurity management of automated information systems]. *Trudy ISA RAN*, 2011, no. 61, pp. 8–13.
6. Tsygichko V.N., Kononov A.A., Polikarpov A.K. Kontseptsiya sistemy upravleniya riskami narusheniya tamozhennogo zakonodatelstva [The concept of risk management violations of customs legislation]. *Trudy ISA RAN*, 2011, no. 31, pp. 21–41.
7. Stislavskiy A.B., Kononov A.A. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya bezopasnostyu obektov transportnoy infrastruktury [Automated safety management system of transport infrastructure]. *Trudy ISA RAN*, 2009, no. 31, pp. 52–73.
8. Frolov K.V. *Bezopasnost Rossii. Pravovye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Analiz riska i problem bezopasnosti. Nauchno-metodicheskaya baza analiza riska i bezopasnosti* [Russia's security. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Risk analysis and security issues. Scientific and methodological basis of risk analysis and security]. Moscow, Znanie Publ., 2007. P. 4, 864 p.
9. D'Atri M.F., Rodriguez D., Garcia-Martinez R. Improving pipeline risk models by using data mining techniques. *Proc. 24<sup>th</sup> World Gas Conference*. Buenos Aires, 2009. Available at: <http://www.igu.org/html/wgc2009/papers/docs/wgcFinal00663.pdf> (accessed 28 January 2014).
10. Selva R., Eng C., Mech F.I. Risk Based Inspection (RBI) Best Practice: The Technical Specification for Ensuring Successful Implementation. *Proc. 13<sup>th</sup> International Conference on Pressure Vessel & Piping Technology*. London, 2012. Available at: [http://www.ppsimtech.com/downloads/risk\\_based\\_inspection\\_best\\_practice-the\\_technical\\_specification\\_ron\\_selva\\_pp\\_simtech\\_keynote\\_paper-1\\_13th\\_icpvt\\_2012\\_london.pdf](http://www.ppsimtech.com/downloads/risk_based_inspection_best_practice-the_technical_specification_ron_selva_pp_simtech_keynote_paper-1_13th_icpvt_2012_london.pdf) (accessed 28 January 2014).
11. Selvik J.T., Scarf P., Aven T. An extended methodology for risk based inspection planning. *Reliability: Theory & Applications*, 2011, no. 20. Available at: [http://gnedenko-forum.org/Journal/2011/012011/RTA\\_1\\_2011-12.pdf](http://gnedenko-forum.org/Journal/2011/012011/RTA_1_2011-12.pdf) (accessed 28 January 2014).
12. Dadonov Yu.A. Otsenka riska avariy na magistralnykh nefteprovodakh KTK-R i BTS [Assessment of risk of accidents on the main oil KTK-R and BTS]. *Upravlenie promyshlennoy bezopasnostyu*, 2002. Available at: [http://programs.safety.ru/BTP/2002\\_6/02\\_06\\_2-6.pdf](http://programs.safety.ru/BTP/2002_6/02_06_2-6.pdf) (accessed 28 January 2014).
13. Lisanov M.V. Analiz riska magistralnykh nefteprovodov pri obosnovanii proektnykh resheniy, kompensiruyushchikh otstupleniya ot deystvuyushchikh trebovaniy bezopasnosti [Risk Analysis of main oil pipelines in justification of design decisions to compensate deviations from safety requirements]. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti. Analiz riskov*, 2010, no. 3. Available at: [http://www.safety.ru/downloads/publik\\_s/analiz\\_riska/4.6.%20%D0%9B%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2.PDF](http://www.safety.ru/downloads/publik_s/analiz_riska/4.6.%20%D0%9B%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2.PDF) (accessed 28 January 2014).

14. *GOST R ISO/MEK 31010–2011. Menedzhment riska. Metody otsenki riska* [State Standard 31010–2011. Risk management. Risk assessment techniques]. Moscow, Standartinform, 2011. 74 p.
15. Kukalo I.A. Model ugroz sistemy fizicheskoy zashchity lineynoy chasti magistralnogo nefteprovoda [The threat model of the physical protection of the linear part of the main pipeline]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 5, pp. 37–41.
16. Tarasenko F.P. *Prikladnoy sistemny analiz* [Applied System Analysis]. Moscow, KNORUS Publ., 2010. 224 p.
17. *Postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 16 fevralya 2008 g. № 87 g. Moskva* [Government Decree of 16 February 2008 № 87 Moscow]. Available at: <http://www.rg.ru/2011/07/26/tek-dok.html> (accessed 28 January 2014).
18. Jiang G., Cybenko G. Fellow Temporal and Spatial Distributed Event Correlation for Network Security. *Proc. of the 2004 American Control Conference*. Boston, 2004. Available at: [http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/acc04/Papers/0173\\_WeM11.4.pdf](http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/acc04/Papers/0173_WeM11.4.pdf) (accessed 28 January 2014).
19. Fink D., Hochachka W.M. Spatiotemporal exploratory models for broad-scale survey data. *The Ecological Society of America*, 2010, no. 20. Available at: <http://faculty.bscc.cornell.edu/~hooiker/STEM.pdf> (accessed 28 January 2014).
20. Wang X., Brown D.E. The spatio-temporal modeling for criminal incidents. *Security Informatics*. 2012. Available at: <http://www.security-informatics.com/content/1/1/2> (accessed 28 January 2014).
21. Frolov K.V. *Bezopasnost Rossii. Pravovoye, sotsialno-ekonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Analiz riskov i upravlenie bezopasnostyu: metodicheskie rekomendatsii* [Russia's security. Legal, socio-economic and scientific-technical aspects. Risk analysis and safety management: guidelines]. Moscow, Znanie Publ., 2008. 672 p.
22. Emrich T., Kriegel H.-P., Mamoulis N., Renz M., Zulfle A. *Querying Uncertain Spatio-Temporal Data*. Available at: [http://i.cs.hku.hk/~nikos/ICDE12\\_UncertainST.pdf](http://i.cs.hku.hk/~nikos/ICDE12_UncertainST.pdf) (accessed 28 January 2014).
23. *The Synergi Pipeline software*. Available at: [http://www.dnv.com/services/software/products/synergi/synergi\\_pipeline/index.asp](http://www.dnv.com/services/software/products/synergi/synergi_pipeline/index.asp) (accessed 28 January 2014).
24. *Pipeline Risk Controller Version 2.0 for Windows*. Available at: <http://www.gulfpub.com/product.asp?ProductID=2428> (accessed 28 January 2014).
25. *The Multi-Analytic Risk Visualization*. Available at: [http://www.dnv.com/moreondnv/research\\_innovation/programmes/materials/sensors/marv.asp](http://www.dnv.com/moreondnv/research_innovation/programmes/materials/sensors/marv.asp) (accessed 28 January 2014).