

УДК 51-74:001.5

## ОЦЕНКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ В КОНТРОЛЕ И УПРАВЛЕНИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Серда С.Н.

*Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Муром,  
e-mail: sereda-2010@mail.ru*

В работе рассматривается задача количественной и качественной оценки риска выполнения производственного процесса, как меры несоответствия параметров процесса, подлежащих контролю и управлению. Предложена математическая модель возможной функции оценки и определен класс аналитических функций, удовлетворяющих поставленным условиям. Для качественного анализа риска проводится сегментация функции оценки на четыре качественных уровня (L1 хороший, L2 удовлетворительный, L3 плохой, L4 критический) согласно различным площадным критериям: равных площадей, золотого сечения и геометрической прогрессии. Определены векторы площадей сегментов по указанным критериям. Пороги сегментации определяются по заданным значениям площадей сегментов итерационным методом нахождения корня разностной функции в программе Маткад. Приводятся сравнительные результаты сегментации функции оценки по площадным критериям. Показано, что прогрессивный критерий является наиболее строгим из представленных, так как определяет более «жесткие» границы уровней сегментов. Выбор функции оценки, числа сегментов, как и критерия пороговой сегментации, определяется конкретными задачами прикладной области. Задавая желаемые значения порогов сегментов, можно управлять системой оценки исходя из заданных условий и приемлемого уровня риска выполнения технологического процесса. Предложена первичная оценка уровня несоответствий, учитывающая риск потенциальных последствий.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, сегментация, функция оценки, анализ риска, управление риском, безопасность труда

## ASSESSMENT OF PROFESSIONAL RISKS IN THE CONTROL AND MANAGEMENT OF MANUFACTURING PROCESSES

Sereda S.N.

*Murom Institute (branch) of Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs,  
Murom, e-mail: sereda-2010@mail.ru*

The paper considers the problem of quantitative and qualitative assessment of the risk of the production process, as a measure of the inconsistency of the process parameters to be monitored and controlled. A mathematical model of a possible evaluation function is proposed and a class of analytical functions satisfying the set conditions is defined. For a qualitative analysis, the evaluation function is segmented into four qualitative levels (L1 good, L2 satisfactory, L3 bad, L4 critical) according to various areal criteria: equal areas, golden section, and geometric progress. The vectors of the areas of the segments were determined according to the specified criteria. The segmentation thresholds are determined by the specified values of the areas of the segments by the iterative method of finding the root of the difference function in the Mathcad program. The comparative results of segmentation of the evaluation function by areal criteria are presented. It is shown that the progressive criterion is the rigorous of the presented ones, since it defines more “hard” boundaries of the segments’ levels. The choice of the evaluation function, the number of segments as well as the criteria for threshold segmentation, is determined by the specific tasks of the application area. By setting the desired values for the segment thresholds, one can control the evaluation system based on the specified conditions and the acceptable level of risk of the technological process. Taking into account the risk of potential consequences, a primary assessment of the level of inconsistencies is proposed.

**Keywords:** mathematical modeling, segmentation, evaluation function, risk analysis, risk management, occupational safety

Контроль технологических процессов проводится с целью обеспечения качества и безопасности выполнения работ путем своевременного обнаружения несоответствий и нарушений, которые могут повлечь за собой риск возникновения техногенной аварии, несчастного случая или остановки производства с причинением экологического и социально-экономического ущерба. При этом накопленные статистические данные наблюдений слу-

жат основой для апостериорной оценки профессионального риска, предусматривающей применение некоторого математического аппарата, в частности функций оценки риска.

Научно-методические основы оценки профессиональных рисков изложены в многочисленных работах, в том числе вопросы системного анализа и менеджмента техногенного риска [1], методик расчета риска [2], построения систем управления промыш-

ленной безопасностью [3], применение интеллектуальных систем поддержки принятия решений [4] и риск-ориентированного прогнозирования и предупреждения аварий [5], влияние условий труда на профессиональный риск [6], совершенствование условий безопасности и охраны труда на производственных объектах [7], оценки эффективности методов снижения экологического риска [8], принципы управления риском [9], критерии приемлемого риска [10], а также проблемы внедрения системы оценки и управления профессиональными рисками [11].

Кроме того, вопросы оценки и управления рисками регламентируются с нормативно-правовой стороны. Так, приказом Ростехнадзора [12] утверждено руководство по безопасности, устанавливающее методику проведения анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах. А в стандарте системы менеджмента риска предлагается ряд других методик оценки риска [13]. В частности, для ранжирования и сопоставления рисков предложены несколько различных инструментов: индексы риска, матрицы вероятности/последствий, S – кривые и др.

Таким образом, состояние проблемы оценки профессиональных рисков находится в стадии совершенствования научно-методического и теоретико-практического инструментария, что определяет актуальность данной темы.

#### Постановка задачи исследования

Пусть в какой-либо системе требуется контролировать  $N$  параметров на соответствие установленным нормам или допустимым значениям. Тогда  $M$  – некоторое число параметров  $M \subset N$ , для которых выявлены несоответствия по результатам наблюдений

за системой. Требуется дать количественную и качественную оценку результатов контроля. На основе вероятностного подхода можно определить первичную количественную характеристику риска, как относительную частоту несоответствий  $x$  в виде отношения

$$X = M / N, \quad (1)$$

Определим функцию риска  $R(x)$  как непрерывную возрастающую функцию, определенную на интервале  $x \in [0, 1]$ , принимающую значения  $R(x) \in [0, 1]$ , выраженные в относительных единицах. Тогда функция  $f(x) = 1 - R(x)$  является противоположной по смыслу характеристикой уровня безопасности, надежности, качества и др. Таким образом, необходимо найти аналитическую функцию  $f(x)$ , взаимосвязанную с функцией риска, как мерой несоответствий, и определить критерии качественного анализа значений такой функции для последующего принятия решений относительно текущего состояния контролируемой системы. Например, можно задать сегментацию функции оценки на четыре качественных уровня:  $L1$  хороший,  $L2$  удовлетворительный,  $L3$  плохой,  $L4$  критический (неприемлемый). Однако допустима и бинарная сегментация, как и сегментация на три, пять и более уровней.

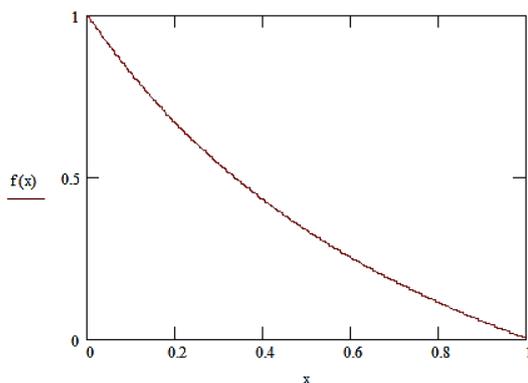
#### Математическая модель функции оценки

Для количественной оценки уровня соответствия контролируемых параметров возьмем следующую функцию (рис. 1, а)

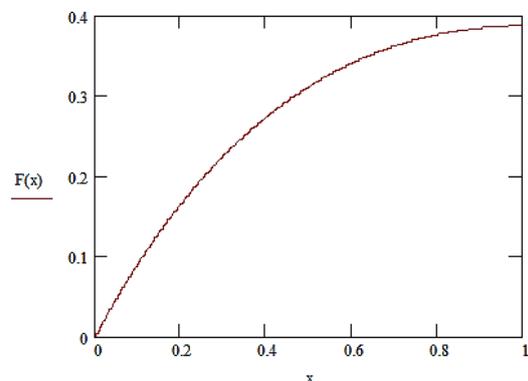
$$f(x) = \frac{1-x}{1+x}, \quad (2)$$

Её первообразная (рис. 1, б) имеет вид

$$F(x) = 2 \cdot \ln(1+x) - x + C, \quad (3)$$



а)



б)

Рис. 1. График функции оценки и ее первообразной

*Выбор порогов сегментации  
функции оценки*

В качестве критериев выбора порогов сегментации функции оценки можно использовать, например, задание уровней аргумента  $x$  или значений функции  $f(x)$ , исходя из прикладной области, что требует дополнительного обоснования. Например, можно задать уровни согласно равномерному распределению. С другой стороны, можно определить пороги сегментации на основе соотношения площадей сегментов, ограниченных функцией оценки и осями координат. Способы задания отношений также могут определяться в контексте задачи. Например, можно использовать критерий равных площадей сегментов; критерий, базирующийся на принципе *золотого сечения*; прогрессивный критерий и др.

По критерию равных площадей площадь каждого из четырех сегментов одинакова  $S_k = 25\%$ . По критерию золотого сечения вектор значений площадей сегментов составит

$$S = [\varphi^4 \ \varphi^3 \ \varphi^2 \ \varphi], \quad (4)$$

где  $\varphi = 0,618034$  – коэффициент пропорции, а  $\varphi^k$  –  $k$ -я степень числа  $\varphi$ .

Согласно прогрессивному критерию площади сегментов можно задать как соотношения членов геометрической прогрессии

$$S_k = q^{k-1} : \frac{(q^k - 1) \cdot b_1}{q - 1}, \quad (5)$$

где  $b_1 = q^0 = 1$  – первый член прогрессии;  $q$  – коэффициент пропорции.

Например, при  $q = 3$  получим

$$S = \left[ \frac{1}{40} \ \frac{3}{40} \ \frac{9}{40} \ \frac{27}{40} \right].$$

На рис. 2 показаны диаграммы соотношений площадей сегментов, найденным по разным площадным критериям.

Поскольку каждый сегмент представляет собой одну из четырех зон функции оценки  $f(x)$ , то, задавая желаемые соотношения сегментов, можно управлять системой оценки исходя из текущих условий.

Площади зон сегментов функции оценки можно найти по формуле

$$S = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = F(x) \Big|_{x_1}^{x_2} = F(x_2) - F(x_1), \quad (6)$$

где  $F(x)$  – первообразная функции  $f(x)$ .

Для определения значений порогов сегментов по заданным площадям сегментов функции оценки необходимо решить обратную задачу, то есть найти обратную функцию  $x = F^{-1}(x)$ . На практике аналитическое решение этой задачи может быть затруднительно. Поэтому воспользуемся численным методом решения эквивалентной задачи поиска корня уравнения (рис. 3), представляющей собой разностную функцию

$$f2(x) - g2(x, F(x)) = 0, \quad (7)$$

где  $f2(x) = \ln(1 + x)^2$ ;  $g2(x, F(x)) = x + F(x)$  – функции, составленные для функций (2) и (3).

Решение можно найти с помощью встроенной функции *root* в программе Mathcad. Результаты расчетов сведены в табл. 1 и показаны графически на рис. 4.

Сравнение полученных результатов показывает, что прогрессивный критерий является наиболее строгим из представленных, так как определяет более «жесткие» границы уровней сегментов. Оценка по данному критерию характеризует, что при контроле  $N = 100$  параметров граничные значения количества несоответствий по сегментам составят: 1, 5, 15. Другими словами, уровень *L1* обеспечивается, если зафиксировано менее одного несоответствия, уровень *L2* – не более четырех несоответствий, уровень *L4* – более сорока несоответствий.

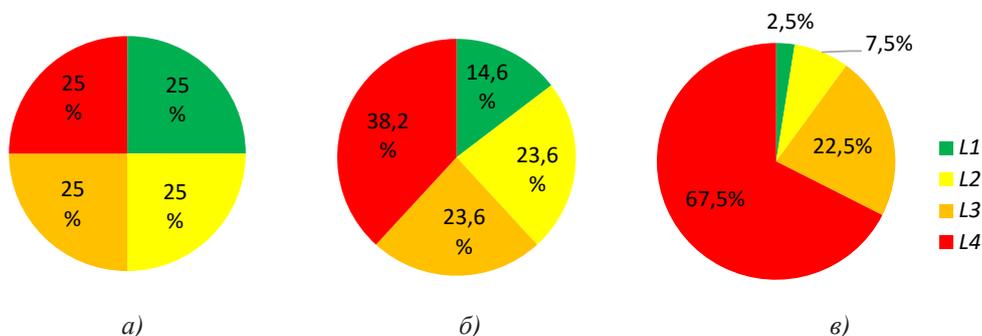


Рис. 2. Сегментация функции оценки по критериям:  
а) равных площадей; б) золотого сечения; в) прогрессивный

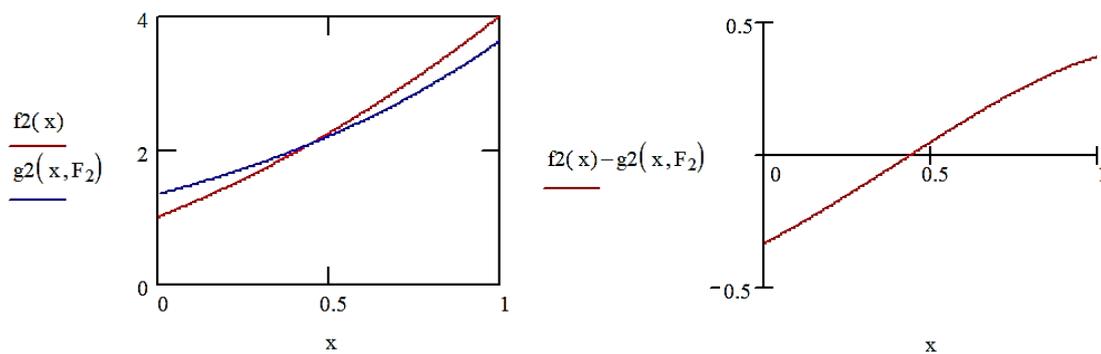
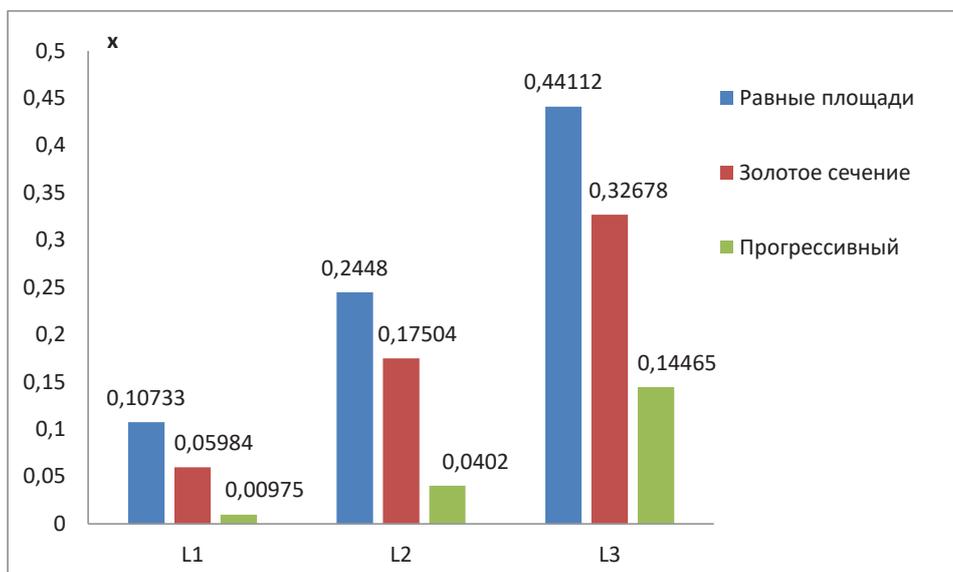
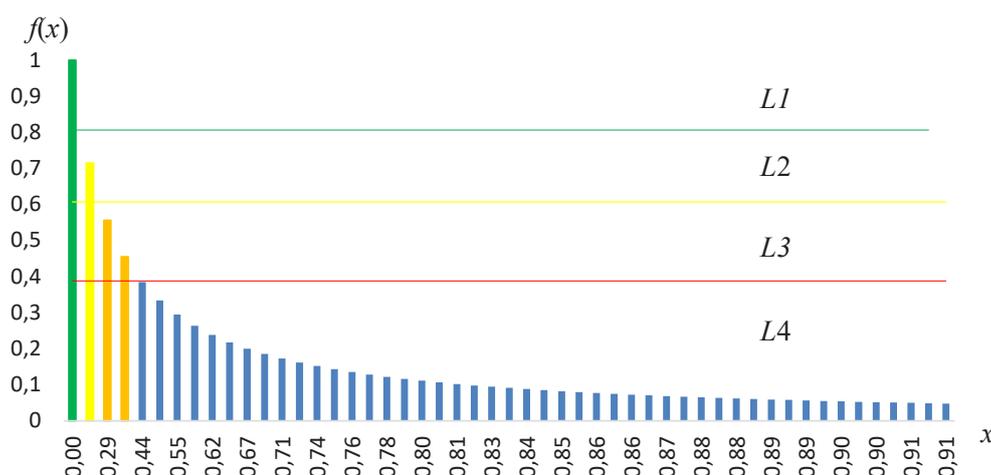


Рис. 3. Поиск корня разностной функции



а)



б)

Рис. 4. Результаты пороговой сегментации функции оценки:  
 а) уровни сегментации функции оценки  $f(x)$  по различным критериям;  
 б) пороговые значения сегментации функции оценки  $f(x)$  по критерию равных площадей

Таблица 1

Сегментация функции оценки по площадным критериям

Критерий	Равные площади		Золотое сечение		Прогрессивный	
	$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
L1	0,10733	0,806	0,05984	0,8871	0,00975	0,9807
L2	0,24480	0,607	0,17504	0,7021	0,0402	0,9227
L3	0,44112	0,388	0,32678	0,5074	0,14465	0,7473
L4	> 0,44112	< 0,388	< 0,32678	< 0,5074	> 0,14465	< 0,7473

Таблица 2

Функции оценки в задаче анализа риска

№	$f(x)$	$F(x)$	$C$
1	$f1(x) = (1-x)^m, m \geq 1$	$(-1)^m \cdot \frac{(x-1)^{m+1}}{m+1} + C$	$\frac{1}{m+1}$
2	$f2(x) = 1 - \sqrt[m]{x}, m \geq 1$	$x - \frac{m \cdot x^{\frac{m+1}{m}}}{m+1}$	0
3	$f3(x) = 1 - \log_2^m(x+1)$	$x - \frac{(x+1) \cdot \ln(x+1) - x}{\ln 2}$ , при $m = 1$	0
4	$f4(x) = 1 - \arctg \frac{x\pi}{2}$	$x + \frac{1}{\pi} \cdot \ln((\pi x)^2 + 4) - x \cdot \arctg\left(\frac{\pi x}{2}\right) + C$	$\frac{2}{\pi} \ln 2$
5	$f5(x) = 1 - \sin^m\left(\frac{x\pi}{2}\right)$	$x + \frac{2}{\pi} \cdot \cos \frac{x\pi}{2} + C$ , при $m = 1$	$\frac{2}{\pi}$
6	$f6(x) = \frac{e^{1-x} - 1}{e - 1}$	$-\frac{e^{1-x} + x}{e - 1} + C$	$\frac{e}{e - 1}$
7	$f7(x) = 1 - \frac{e + e^{-1}}{e - e^{-1}} \cdot th(x)$	$-\frac{e + e^{-1}}{e - e^{-1}} \cdot \ln(e^x + e^{-x}) + C$	$\frac{e + e^{-1}}{e - e^{-1}} \cdot \ln 2$
8	$f9(x) = 1 - \frac{arch(x+1)}{\ln(2 + \sqrt{3})}$	$x + \frac{\sqrt{x^2 + 1} - x \cdot arsh(x)}{\ln(1 + \sqrt{2})}$	0
9	$f8(x) = 1 - erf(2x)$	$x - x \cdot erf(2x) - \frac{e^{-4x^2}}{2\sqrt{\pi}} + C$	$\frac{1}{2\sqrt{\pi}}$

### Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотренная выше функция  $f(x)$  и методика оценки риска при контроле соответствия параметров системы (процесса) демонстрирует общий подход к решению задачи. В то же время можно определить класс функций оценки, соответствующих заданным требованиям, которые также можно использовать при анализе риска. Некоторые функции, принадлежащие данному классу, приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Выбор конкретной функции оценки, критерия пороговой сегментации, количества сегментов определяется прикладными задачами.

Кроме того, если помимо фиксации числа несоответствий требуется учесть риск потенциальных последствий, можно ввести некоторую числовую шкалу значимости с заданными весовыми коэффициентами для оценки каждого зафиксированного несоответствия. В этом случае вместо формулы (1) можно использовать первичную оценку в виде скалярного суперкритерия

$$x = \frac{1}{N} \cdot \sum \alpha_i \cdot M_i, \quad (8)$$

где  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты значимости;  $M_i$  – число нарушений  $i$ -го типа,  $i \in [1, H]$ .

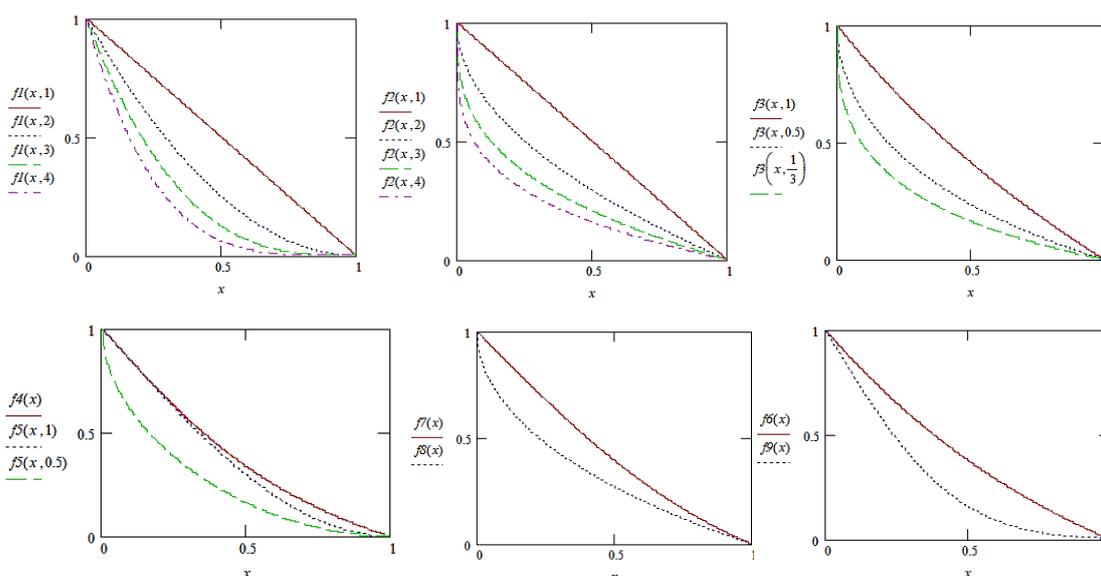


Рис. 5. Функции оценки

Количество типов нарушений  $H$  конечно и определяется возможным числом реальных или потенциальных последствий, качественно различающихся степенью социально-экономического и/или экологического ущерба.

Следует отметить, что предложенный подход к математическому моделированию риска вполне применим к задачам оценки уровня обученности производственного персонала, как и вообще уровня подготовки в системе обучения, на основе тестовой системы оценки знаний. Еще одной потенциальной прикладной областью применения рассмотренной методики является оценка степени износа в процессе диагностики состояния строительных конструкций.

### Заключение

Резюмируя все вышесказанное, в работе предложена математическая модель функции оценки уровня безопасности, площадные критерии сегментации функции оценки на качественные уровни, алгоритм определения порогов сегментации. Представлены некоторые результаты моделирования и приводятся рекомендации практического применения модели.

Рассмотренная в данной работе методика оценки была апробирована в работе службы контроля безопасности выполнения работ на предприятии АО ВМЗ.

### Список литературы

1. Белов П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование: учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры. М.: Юрайт, 2014. 728 с.

2. Галеев А.Д., Поникаров С.И. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах: учебное пособие / Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. 152 с.

3. Мельникова Д.А. Теоретические и практические аспекты построения системы управления промышленной безопасностью на опасных производственных объектах: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2016. 120 с.

4. Макеев С.М. Методы и алгоритмы анализа техногенного риска при интеллектуальной поддержке принятия управленческих решений в регионе: дис. ... канд. техн. наук. Орел, 2017. 136 с.

5. Гражданкин А.И., Белов П.Г. Анализ опасностей и оценка риска крупных аварий в нефтегазовой промышленности: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2018. 370 с.

6. Федорев А.Г. Понятие «профессиональный риск» в международной и национальной практике // Безопасность в техносфере. 2014. № 2. С. 40–47.

7. Озден И.В., Султанов Р.М., Хафизов И.Ф., Бекбаева Б.Д., Табульдина А.Т., Кокорин В.В. Совершенствование условий безопасности и охраны труда на производственных объектах // Техносферная безопасность. 2018. № 4 (21). С. 158–164.

8. Серда С.Н. Анализ эффективности методов снижения экологического риска // «Машиностроение и безопасность жизнедеятельности». 2013. № 4 (18). С. 25–30.

9. Кузьмин И.И. Принципы управления риском // Проблемы анализа риска. 2006. Т. 2. № 1. С. 73–93.

10. Лисанов М.В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 5. С. 11–14.

11. Ильин С.М., Черданцев А.Г. К вопросу о внедрении системы оценки и управления профессиональными рисками // Охрана и экономика труда. 2012. № 1. С. 11–15.

12. Приказ Ростехнадзора от 11.05.2016 № 144 «Об утверждении Руководства по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420347908> (дата обращения: 07.07.21).

13. ГОСТ Р 58771-2019 Менеджмент риска. Технологии оценки риска: дата введения 2020-03-01. М.: Стандартинформ, 2020. 86 с.