

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ФАКТОРОВ РИСКА АВИАЦИОННЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

к. т. н. *В. Д. Шаров*, ООО «Волга-Днепр-Москва»,
д. т. н., профессор. *А. Г. Гузий*, ООО «Волга-Днепр-Москва»,
ВВИА им. Н. Е. Жуковского,
к. т. н. *С. М. Гладкин*, ВВИА им. Н. Е. Жуковского

В статье рассматривается возможность оценивания рисков авиационных происшествий. Для этого предлагается использовать логико-вероятностную теорию безопасности как наиболее подходящую при прогнозировании трудноформализуемых процессов или явлений. Для оценки искомых вероятностей вводится методика, основанная на сочетании методов планирования эксперимента и теории нечетких множеств.

Согласно концепции активного предотвращения авиационных происшествий (АП) [1], безопасность предстоящих полетов достигается путем заблаговременного снижения уровня риска АП до уровня, определяемого как допустимый (концепция приемлемого уровня безопасности полетов [2]). Достижение уровня риска, соответствующего допустимому, - интерактивный процесс идентификации и количественного оценивания степени влияния как отдельных потенциальных факторов риска АП по компонентам системы «Экипаж-Воздушное судно-Среда» («Э-ВС-Ср») и их совокупности, так и факторов предотвращения АП с последующим синтезом управленческих воздействий, направленных на минимизацию суммарного риска АП, априорной оценкой эффективности этих воздействий, их количественной оптимизацией и практической реализацией с окончательным контролем [3].

Для обеспечения эффективности и целенаправленности управленческих воздействий (принцип направленности управления [3]) требуется достоверное диагностирование «тонких мест» в системе «Э-ВС-Ср» с априорным количественным оцениванием степени влияния наиболее значимых факторов риска АП.

Задача оценивания рисков АП относится к задачам прогнозирования трудноформализуемых процессов или явлений. Получение детерминированной информации по рискам является скорее исключением, чем правилом. Детерминированные и стохастические модели в изучении безопасности объектов повышенного риска в целом играют подчиненную роль и, вероятно, не способны стать базой знаний интеллектуальных систем прогнозирования и управления рисками АП в реальном масштабе времени.

В данной статье сделан акцент на рассмотрение факторов среды. Каждая подгруппа факторов среды оценивается как некоторая подсистема, состояние которой характеризуется вероятностью, с которой может произойти АП под воздействием факторов, входящих в эту подгруппу. Такой

подход позволяет применить для оценки искомой вероятности методику, основанную на сочетании методов планирования эксперимента и теории нечетких множеств, которая применяется для оценки технического состояния объектов повышенного риска.

Формализация нечеткой информации в виде лингвистических переменных позволяет обрабатывать и интерпретировать качественную информацию в виде экспертных оценок в количественном виде. Это дает возможность объединить количественные и качественные признаки изменений состояния объекта в рамках единой измерительной шкалы.

Существуют различные подходы к решению задачи. Одним из вариантов может быть использование логико-вероятностной теории безопасности (ЛВТБ) [4]. Эта теория опирается на хорошо разработанный математический аппарат – логико-вероятное исчисление – и с успехом применяется для оценки безопасности различных структурно-сложных систем. Возможный вариант применения ЛВТБ для оценки безопасности полетов по группе факторов «Среда» приведен в [5]. В качестве такой оценки предлагается использовать синтезированную функцию, позволяющую рассчитать вероятность $P(OC)$ перехода авиационно-транспортной системы в опасное состояние (ОС). Поскольку ОС понимается как событие с неприятным ущербом, $P(OC)$ рассматривается как оценка риска в предстоящем полете.

Аналитическое описание опасного состояния осуществляется в ЛВТБ с помощью логической функции опасности системы, аргументами которой являются инициирующие условия (ИУ), обозначаемые как z_i . Вероятность $P(OC)$ представляет собой вероятность истинности булевой функции, полученной в виде дизъюнкции всех имеющихся кратчайших путей, ведущих к ОС: $P(OC) = P\{y(z_1, \dots, z_m) = 1\}$.

После выполнения процедуры полного замещения логических переменных z_i на вероятности их истинности формула приводится к виду:

$$P(OC) = P(Q_i, S_i) \quad (1)$$

где Q_i - исходные вероятности истинности или «опасности» ИУ;

$S_i = 1 - Q_i$ - соответственно, вероятности «безопасности» этих элементов.

Хотя ЛВТБ позволяет делать определенные выводы об относительных весах факторов опасности и при отсутствии численных значений Q_i , для вычисления $P(OC)$ эти вероятности необходимы. Ввиду сложности системы факторов среды, наличия неоднородных компонентов и многообразия связей, деление на ИУ может быть различным, при этом в каждое ИУ приходится включать несколько факторов. В [5] выделено 11 ИУ и 14 логических блоков конъюнкции этих элементов. При этом расчетная формула выражения (1) состоит из 28 слагаемых, в каждое из которых входит от двух до 11 элементов. Каждое ИУ включает ряд факторов, Например, в одном ИУ были объединены сложные метеоусловия, опасные метеорологические и геофизические явления и опасность столкновения с птицами. Воздействие на

каждый фактор может рассматриваться как превентивное мероприятие по снижению риска АП.

Рассматривается возможность получения вероятностей Q_i с использованием методов формализации нечеткой информации.

Получить Q_i на основе статистической информации затруднительно, а в ряде случаев невозможно. Рассмотрим некоторые исходные статистические данные.

По данным, представленным на сайте Всемирного фонда безопасности полетов (FSF) <http://aviation-safety.net/> [6] с 1977 по 2006 гг. произошло 547 АП, в которых основными факторами являлось воздействие окружающей среды. Общее количество полетов мировой гражданской авиации за этот период может быть приблизительно оценено в 360 млн. [MEDA]. Частоты АП по подгруппам факторов среды, в соответствии с тем, как они объединены в статистике FSF, приведены в таблице 1.

Очевидно, что эти средние значения и при условии дальнейшего деления подгрупп на все более мелкие секции факторов мало что дают для оценки риска предстоящего полета. Для различных регионов полетов, аэродромов, времени года (суток) и т. д. данная характеристика будет разной.

Получить достоверные оценки Q_i по статистическим данным можно только для ограниченного числа факторов, например, вероятность столкновения с птицей в данное время на данном аэродроме. Большинство воздействий факторов среды являются редкими событиями.

Таблица 1

Частота АП по подгруппам факторов среды (1977 – 2006 гг)

№ п/п	Подгруппа факторов	АП	Частота
1	ATC & Navigation - УВД и навигация (неисправности наземных РТС, ошибочные и неверно истолкованные инструкции, полет в СМУ по правилам ПМУ)	44	$1,22 \times 10^{-7}$
2	Collision – Столкновение (ВС с другими ВС, объектами в воздухе и на земле, птицами)	134	$3,72 \times 10^{-7}$
3	External Factors - Внешние воздействия (посторонние предметы, спутный след, повреждения градом и ветром на стоянке)	42	$1,17 \times 10^{-7}$
4	Security – Авиационная безопасность (захват ВС, взрывы, террористы-самоубийцы, поражение гражданских ВС средствами ПВО)	156	$4,33 \times 10^{-7}$
5	Weather – Погодные условия (опасные метеоявления, сложные метеоусловия)	171	$4,75 \times 10^{-7}$
	Всего по группе «Среда»	547	$1,52 \times 10^{-6}$

Проводятся исследования по предварительному расчету опасного воздействия метеоусловий. В [7] под «сбойной ситуацией» по условиям внешней среды понимается период, когда метеоусловия становятся ниже минимума посадки или взлета ВС. Утверждается, что коротко-периодические процессы, свойственные таким сбойным ситуациям (менее 9 часов), описываются марковским процессом. В системе оценки используется метод спектральных плотностей, строится стохастическая сетевая модель, сбойная ситуация оценивается как по времени, так и по площади. Однако в результате система оценки ориентируется, прежде всего, на использование прогнозов (METAR) и фактической погоды (TAF). Оценки по приведенным в [7] формулам представляют интерес, прежде всего при расчетах, связанных с экономичностью и регулярностью полетов, и не могут непосредственно использоваться для расчета опасности влияния метеофакторов на БП.

Анализ климатических временных рядов [8] показал, что общепризнанными являются только две чисто периодические составляющие: суточный и годовой ход. Многочисленные исследования показали, что климатические временные ряды не принадлежат к периодическим коррелированным процессам и циклы с этих позиций не могут быть осмыслены.

Отмечены определенные закономерности в воздействии геофизических факторов на БП [9]. В частности, установлена зависимость числа АП на годичных и квартальных интервалах от числа катастрофических землетрясений и солнечных вспышек. Предлагается введение индекса геофизической опасности для полетов ВС в алгоритм краткосрочного прогнозирования влияния геофизических факторов на БП.

Результаты подобных исследований, безусловно, заслуживают внимания, однако в настоящее время единственной общепризнанной методикой оценки риска АП в предстоящих полетах является Контрольный перечень CFIT, применяемый для оценки риска столкновения исправного ВС с землей [10]. В этом методе используется система баллов и коэффициентов. При формировании коэффициентов, безусловно, использовалась статистика АП, это видно из сравнения коэффициентов риска перечня CFIT и статистических данных из Обзора состояния уровня БП авиационных властей Великобритании [11], соответствующего году формирования перечня (табл. 2). Очевидно, что численные показатели, используемые в этом перечне, также не могут быть непосредственно использованы для получения оценок вероятности Q_i .

С помощью данного перечня оцениваются риски только событий типа CFIT, и он не отслеживаются другие опасные ситуации. Одинаковые коэффициенты и баллы применяются к большим регионам с десятками и сотнями аэродромов. Например, для всего СНГ применяется один коэффициент риска 3,0. Между тем по данным FSF, например, с ВС, следующими на а/д Иркутск, с 1958 по 2006 г. произошло 11 АП, а с ВС, вылетающими из Иркутска - 6 АП. Для сравнения, с ВС, вылетающими из а/д Домодедово и с ВС, направлявшимися в Домодедово за всю историю

аэропорта произошло по 10 АП. С учетом значительной разницы в количестве рейсов, обслуживаемых этими аэропортами, риск при полете в Иркутск существенно выше.

Из сравнительного апостериорного анализа риска имевших место АП очевидно, что методика Контрольного перечня CFIT неэффективна в плане предотвращения АП, а в ряде случаев противоречит фактам [12] по причинам:

- положенный в основу методики несовершенный балльный метод оценки состояний не позволяет учитывать информативность факторов, их совокупностей и корреляций;

- перечень не содержит многих, являющихся существенными, факторов риска, не учитываются особенности типов ВС, индивидуальные и групповые особенности членов экипажа, их совместимость,...

- количественные оценки факторов и коэффициентов риска носят субъективный характер, без научного или статистического обоснования, а, следовательно, подлежат корректировке с учетом изменяющихся условий эксплуатации;

- отсутствует возможность учитывать вероятность (частоту) проявления рассматриваемых факторов риска АП (все рекомендуемые для учета факторы оцениваются как достоверные события);

- не предусмотрена количественная (вероятностная) оценка риска АП в полете.

Таблица 2

Относительное количество АП по регионам и коэффициенты риска CFIT

Регион	АП на 100 млн пасс-км	Регион	Коэффициент риска
Африка	7,16	Африка	8,0
Азия	1,86	Ближний Восток	1,1
Китай	2,64	Юго-Восточная Азия	3,0
Остальная Азия	1,78	Евразия (Восточная Европа и СНГ)	3,0
Австралия и Океания	1,2	Австралия/Новая Зеландия	1,0
Европа	0,9	Западная Европа	1,3
Члены JAA	0,78	Южная Америка/Карибский бассейн	5,0
Остальная Европа	1,13	США и Канада	1,0
Южная и Центральная Америка	7,09		
Северная Америка	0,37		

США	0,33
Канада/Карибский бассейн	1,53

Возвращаясь к факторам среды, приведем еще один пример. С 1990 г. по 2006 г. с российскими ВС 1-3 класса произошло 60 инцидентов, в причинах которых указаны отказы различного аэродромного оборудования (данные автоматизированной системы обеспечения безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации РФ АОСБП). Из них 4 инцидента произошли на а/д Салехард, по три в Нижнем Новгороде и Хабаровске, два в Новосибирске (Северном). Очевидно, что оценивая риск опасного воздействия среды при полетах на указанные аэродромы нужно учитывать эти факты. Системы баллов и коэффициентов типа перечня CFIT и используемые в авиакомпаниях корпоративные системы не позволяют это делать.

Попытка заложить в систему балльных оценок все возможные факторы с учетом особенностей аэродромов и регионов полета приведет к непомерному расширению перечня и сделает проблематичным его использование. К тому же перечень будет нуждаться в постоянных доработках и обновлениях.

Использование заранее рассчитанных коэффициентов и баллов для оценки риска позволяет получить лишь ориентировочные оценки риска в условных единицах. Использовать эти данные для расчета по формуле (1) невозможно. Как справедливо отмечено в [7], получение детерминированной информации по рискам является скорее исключением, чем правилом.

В условиях неопределенности исходной информации при принятии решений давно и успешно применяются методы экспертных оценок. Известно, что даже простые статистические методы в связи с этой информацией при выборе перспективных решений часто приводят к более успешным результатам, чем расчеты с ориентацией на средние показатели и экстраполяцию существующих тенденций [13].

Экспертное прогнозирование достаточно широко применяется в отрасли, особенно на корпоративном уровне [13, 14]. В настоящее время существуют методы анализа экспертной информации, позволяющие получить оценки, удовлетворяющие требованиям точности и надежности, необходимых для получения обоснованных оценок [15]. Обычно экспертные оценки используются при прогнозировании какого-то определенного показателя уровня БП или ожидаемой эффективности мероприятий по предотвращению АП [16, 17].

Очевидна возможность использовать метод формализации экспертной информации при логико-лингвистическом описании иницирующего условия возникновения АП. Данный метод применяется для оценки состояния сложно структурированных систем, состоящих из неоднородных компонентов [7]. Метод основан на синтезе теории планирования эксперимента и элементов теории нечетких множеств.

Применяя подход к оценке технического состояния объектов повышенного риска, будем рассматривать каждое ИУ как систему, которая характеризуется некоторым количеством возможных состояний: от 1 до k . В нашем случае состояние 1 соответствует минимальному воздействию данного ИУ на БП. Численной характеристикой состояния примем вероятность Q_i , которая изменяется от некоторого Q_i^1 до Q_i^k . Все промежуточные состояния будем рассматривать упорядоченными, при этом с увеличением номера опасное воздействие данного ИУ возрастает.

Каждое состояние системы «ИУ» описывается совокупностью признаков $x \in X$ как количественного, так и качественного характера. Численные значения количественных признаков в данном случае могут быть получены обработкой статистического материала, а качественные признаки можно измерить только с помощью экспертов [14]. При этом и количественные и качественные признаки представляются с помощью нечеткого множества:

$$\forall x \in X \quad A = \{x, \mu_A(x)\}, \quad (2)$$

где $(x, \mu(x))$ - пара компонентов (синглтон), составленная из признака x и его функции принадлежности $\mu_A(x)$ - степени принадлежности x к множеству X .

Для количественных признаков такая функция имеет вид индикаторной функции:

$$\mu_B(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in B \\ 0, & \text{если } x \notin B \end{cases}.$$

Класс состояний, характеризуемый общим свойством, рассматривается как объединение нечетких множеств. Например, если состояния, связанные с опасными метеоявлениями и геофизическими явлениями, описываются нечеткими множествами A и B соответственно, представляющими собой опасные состояния, связанные с соответствующими явлениями функциями принадлежности $\mu_A(x)$ и $\mu_B(x)$, то нечеткое множество $A \cup B$ имеет функцию принадлежности:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \quad x \in X.$$

Использование одновременно количественных и качественных признаков с функциями принадлежности из интервалов $[0, 1]$ позволяет определенным образом формализовать всю информацию. С точки зрения теории измерений это дает возможность перейти к более сильной шкале, в частности к шкале интервалов. Поскольку количественные признаки всегда могут быть представлены в шкале интервалов, то использование функции принадлежности позволяет унифицировать оценку вероятности Q_i в рамках шкалы интервалов [18].

Для решения практических задач используются нечеткие числа в виде унимодального нечеткого числа LR типа [7]:

$$A = (a, \alpha, \beta), \quad (3)$$

где a - среднее значение нечеткого числа;

α - левый, β - правый коэффициенты нечеткости.

Преимуществом теории нечетких множеств является использование естественного для эксперта языка путем введения понятия лингвистической переменной, характеризуемой набором из элементов:

$$\langle x, T, D \rangle, \quad (4)$$

где x - имя лингвистической переменной (ЛП);

T – множество ее значений или терм-множество;

D – область определения значений.

Изложенный подход обеспечивает получение обобщенного значения параметра, связанного с вероятностью АП по каждой подгруппе факторов в виде полинома.

Полученные в результате использования данного подхода проработанные модели позволяют проводить анализ влияния соответствующих факторов как отдельно, так и в различных сочетаниях, что дает возможность более детально анализировать процесс изменения влияния различных факторов и вырабатывать соответствующие меры по предотвращению АП.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ,
грант № 06-08-01518.

Литература

1. *Гузий А. Г., Малевинский Ю. А.* Концепция предотвращения авиационных происшествий и управление уровнем безопасности полетов. / Труды общества независимых исследователей авиационных происшествий (Выпуск 16). – М.: Полиграф, 2004. С. 166 - 169.
2. Руководство по предотвращению авиационных происшествий. (Doc 9422-AN/923). Первое издание – 1984 год. – ИКАО, 1984.
3. *Гузий А. Г., Онуфриенко В. В.* Методология активного управления уровнем безопасности предстоящих полетов в авиакомпании. / Труды общества независимых исследователей авиационных происшествий (Выпуск 17). – М., 2005. - С. 52 - 62.
4. *Рябинин И. А.* Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – Спб.: Политехника, 2000. - 248 с.
5. Шаров В. Д. Синтез функции априорного оценивания уровня безопасности предстоящих полетов по группе факторов «Среда». // Проблемы безопасности полетов. Вып. № 11. – М.: ВИНТИ, 2007.
6. <http://aviation-safety.net/>
7. *Сильвестров П. Б.* Сбойная ситуация по условиям внешней среды и ее оценка: Учебное пособие. – Л.: ОЛАГА, 1989. - 79 с.
8. *Поляк И. И.* Многомерные статистические модели климата. – Л.: Гидрометиздат, 1989. – 183 с.
9. *Ларичев И. Л.* Воздействие гелиогеофизических факторов на аварийность в гражданской авиации. Автореферат диссертации к. т. н., Ин-т прикладной геофизики, Росгидромет, М., 2004.

10. FSF CFIT Checklist. Evaluate the Risk and Take Action// Flight Safety Digest, Vol. 15. № 7/8 July – August 1996. – FSF, 1996. - p. 26 - 29.
11. CAP 681 Global Safety Oversight Review 1980-1996. Civil Aviation Authority, UK, 1996.
12. *Гузий А. Г.* Системный анализ факторов риска катастрофы Boeing 747-200F. Оценка вероятности катастрофы по априорным данным.// Проблемы безопасности полетов. Информационный сборник. Вып. 5, 2006. - М.: ВИНТИ, 2006.- С. 42 - 59.
13. *Бешелев С. Д. , Гуревич Ф. Г.* Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. - 263 с.
14. *Гузий А. Г., Чуйко А. А.* Методологический подход к экспертному прогнозированию уровня безопасности полетов.// Проблемы безопасности полетов. Информационный сборник. Вып. № 10, 2006. - М.: ВИНТИ, 2006. – С. 3 - 15.
15. *Гузий А. Г.* Апостериорная оценка точности и надежности индивидуального и группового экспертного прогнозирования количества авиационных событий в авиакомпании.// Проблемы безопасности полетов. Вып. № 7, 2007. – М.: ВИНТИ. – 2007. – С. 3 - 12.
16. *Шаров В. Д.* Об одном методе оценки эффективности мероприятий по предотвращению авиационных происшествий. // Проблемы безопасности полетов. Информационный сборник. Вып. № 11, 2006. - М.: ВИНТИ, 2006. – С. 3 - 8.
17. *Симаков А. А., Шаров В. Д.* Методика количественного оценивания эффективности синтезированных мероприятий по предотвращению авиационных происшествий./ Всероссийская научно-техническая конференция «VIII Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского». Материалы. Часть 2. – М.: ВВИА, 2007. – С. 64.
18. *Гладкин С. М., Гузий А. Г.* Использование аппарата интервального анализа для текущего оценивания и прогнозирования показателей уровня безопасности полетов.// Проблемы безопасности полетов. Вып. № 10, 2007. – М.: ВИНТИ. – 2007. – С. (в печати).