

СИНТЕЗ ФУНКЦИИ АПРИОРНОГО ОЦЕНИВАНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЯДУЮЩИХ ПОЛЕТОВ ПО ГРУППЕ ФАКТОРОВ «СРЕДА»

к. т. н. В. Д. Шаров
(ООО «Волга-Днепр-Москва»)

Предлагается методика разработки синтезированной функции оценивания влияния внешней среды на безопасность предстоящих полетов, основанная на применении известного логико-вероятностного метода.

Под средой в широком смысле понимается совокупность всех компонентов сложной динамической системы «Экипаж - Воздушное судно - Среда», которые не могут быть отнесены к экипажу или воздушному судну. Очевидно, что показатели оценки влияния среды должны соответствовать выбранной модели общей оценки безопасности полетов (БП) и быть количественно оцениваемыми.

В Руководстве ИКАО [1] безопасность определяется как состояние, при котором риск причинения вреда лицам или нанесения ущерба имуществу снижен до приемлемого уровня и поддерживается на этом либо более низком уровне посредством непрерывного процесса выявления источников опасности и контроля факторов риска. Таким образом, показателем уровня БП должен быть измеряемый риск, понимаемый обычно как функция вероятности и тяжести авиационного события (АС).

Управление рисками становятся приоритетным в управлении БП (тем более что в английском варианте [1] в приведенном выше определении непосредственно используется понятие “risk management”, переведенное как «контроль факторов риска»), но методология авиационного риск-менеджмента пока не разработана. При этом в ряде работ доказывается ограниченность применения методов теории надежности, на которой исторически базировались оценки БП. Критика основана главным образом на невозможности достоверной оценки вероятности авиационных происшествий (АП) как редких событий. Однако если судить по опубликованным материалам, предлагаемый альтернативный метод «суммы рисков и шансов» сводится к алгебраическому суммированию некоторых баллов и коэффициентов риска опасности и компенсирующих факторов по цепочкам событий. Данный подход действительно используется в известных программах CFIT, FORAS и в некоторых корпоративных системах оценки рисков, однако он имеет и очевидные недостатки: субъективизм при назначении баллов и коэффициентов, трудность оценки взаимозависимости факторов. Очевидно, что методы, основанные на данном подходе, еще нуждаются в дальнейшем развитии.

В тоже время, представляется, что возможности известной логико-вероятностной теории безопасности (ЛВТБ) структурно-сложных систем профессора И. А. Рябинина [2] использованы для оценки БП не в полной мере. Данный метод разработан на основе логико-вероятностной теории надежности, в развитие которой проф. И. А. Рябинин также внес определяющий вклад. Сущность метода состоит в том, что структура системы (построения логических цепей событий и связей элементов) описывается математической логикой, а количественная оценка надежности и безопасности производится с помощью теории вероятностей. При этом используется специально разработанный математический аппарат – логико-вероятностное исчисление. Разработаны и применяются специальные программные продукты, позволяющие анализировать системы с десятками элементов и сложными логическими связями [3].

Достоинством ЛВТБ является ее работоспособность и в отсутствие исходных вероятностей инициирующих событий, что, как правило, является принципиальной трудностью. При этом детерминированная логическая модель позволяет выявить наиболее опасные комбинации элементов - инициирующих условий (ИУ) и инициирующих событий (ИС) - которые могут перевести систему в опасное состояние (ОС).

ОС в [2] понимается как состояние, при котором возникает ущерб «большого масштаба». Если такой ущерб неприемлем, то риск может интерпретироваться как показатель уровня безопасности предстоящего полета в смысле приведенного выше определение из [1].

В рамках этого же метода можно рассматривать ОС в соответствии с [4], как ситуацию, имеющую различные стадии: усложнение условий полета, сложная ситуация, аварийная и катастрофическая ситуация.

Аналитическое описание опасного состояния осуществляется в ЛВТБ с помощью логической функции опасности системы (ФОС), аргументами которой являются ИС и ИУ, обозначаемые в дальнейшем как z_i . Составления ФОС сводится к составлению кратчайших путей опасного функционирования. Каждый такой путь представляется в виде булевой функции:

$$\Phi_i = \bigwedge_{i \in K_{\Phi_i}} z_i ,$$

где K_{Φ_i} - множество номеров ИС, соответствующих данному i -му кратчайшему пути ОС;

\wedge - знак конъюнкции (логического умножения).

Каждое ИС (ИУ) принимает одно из двух значений:

$z_i = 1$ - если i -е условие произошло;

$z_i = 0$ - если i -е условие не произошло.

Реальная система имеет конечное число кратчайших путей перехода в ОС.

Условие ОС системы записывается в виде дизъюнкции (логического отрицания, обозначается \vee) всех имеющихся кратчайших путей, ведущих к ОС:

$$y = (z_1 \dots z_m) = y(z_m) = \bigvee_{i=1}^d \Phi_{ui} = \bigvee_{i=1}^d \left[\bigwedge_{i \in K_{\Phi_i}} z_i \right]. \quad (1)$$

Вероятность истинности булевой функции (1) и представляет собой численное выражение опасности системы:

$$P(OC) = P\{y(z_1, \dots, z_m) = 1\}. \quad (2)$$

Решающее значение для достоверности оценок имеет построение сценария опасной ситуации (СОС). Очевидно, что невозможно учесть все факторы. Решить проблему единственности и полноты при исследовании БП можно за счет организующей роли математики и прагматического установления масштаба исследуемой системы (учет всех обстоятельств только внутри ограниченного объема и ограниченных ресурсов). По образному выражению И. А. Рябинина, «Специалист в области безопасности должен иметь психологию «диверсанта», т. е. грамотно думать, как проще всего привести систему в опасное состояние, в отличие от специалиста по надежности, думающего о сохранении ее работоспособности». [2, стр. 201].

Классификация факторов среды возможна по различным признакам. Один из вариантов, основанный на объединении подходов ИКАО и отечественной практики, приведен в [6]. Однако для построения СОС представляется необходимым обратиться к статистике АП, с тем, чтобы выявить наиболее важные ИС и ИУ среды.

Наиболее полная информация по всем АС содержится на сайте Фонда безопасности полетов (FSF) <http://aviation-safety.net/index.php>. Группа факторов «Среда» в этой статистике включает пять подгрупп: УВД и навигация, столкновения, внешние воздействия, авиационная безопасность и погодные условия. На рис. 1 представлено распределение всех АП группы «Среда» по данным подгруппам факторов.

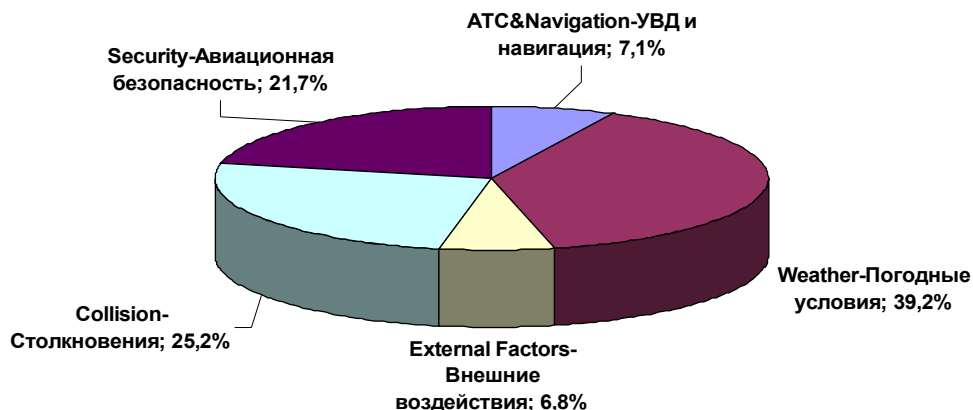


Рис. 1. Распределение АП группы «Среда» по подгруппам

К группе «Среда» отнесены все АП, связанные с террористическими актами, захватом ВС, а также случаи поражения гражданских ВС боевыми самолетами и средствами ПВО. Последние занимают значительное место: за 30 лет из-за применения оружия по гражданским самолетам произошло 82 АС, из них 69 АП, в которых погибло 1937 чел.

На рис. 2 представлена гистограмма абсолютного числа АП за 1977-2006 гг. по группе факторов «Среда» и по другим факторам, а на рис. 3 – доля АС, АП и количества погибших в авиакатастрофах, связанных с воздействием внешней среды, от общего количества.

Из графиков видно, что хотя доля АП по группе «Среда» не превосходила 20%, количество погибших в этих АП почти всегда превышало это значение и в отдельные годы составляло до 40% и более от общего количества. Это говорит о том, что АП по причине внешнего воздействия относятся к наиболее тяжелым. Наибольшее количество погибших в катастрофах, связанных со средой, приходится на следующие годы:

1977 г. – крупнейшая катастрофа в ГА - столкновение двух В-747 в Тенерифе (683 человека погибло);

1985 г. – DC-8 – обледенение на взлете в Гандере (256 чел); В-747 Air India, теракт, (329 чел); В-727, CFIT, (148 чел), Ан-26 сбит под Кандагаром, (52 чел);

1988 – взрыв В-747 над Локерби, (259 чел), А-300, Iran Air, сбит ракетой (290 чел);

1996 г. – столкновение в воздухе В-747 и Ил-76 в Индии (349 чел);

2001 г.– события 11 сентября в США (2343 чел);

2004 г. – взрывы террористами Ту-134 и Ту-154 в РФ (90 чел);

2006 – столкновение в воздухе Б-737 и небольшого самолета в Бразилии, (154 чел), Ту-154, Донецк, гроза, (170 чел), Ан-24, Словаки, CFIT (42 чел).

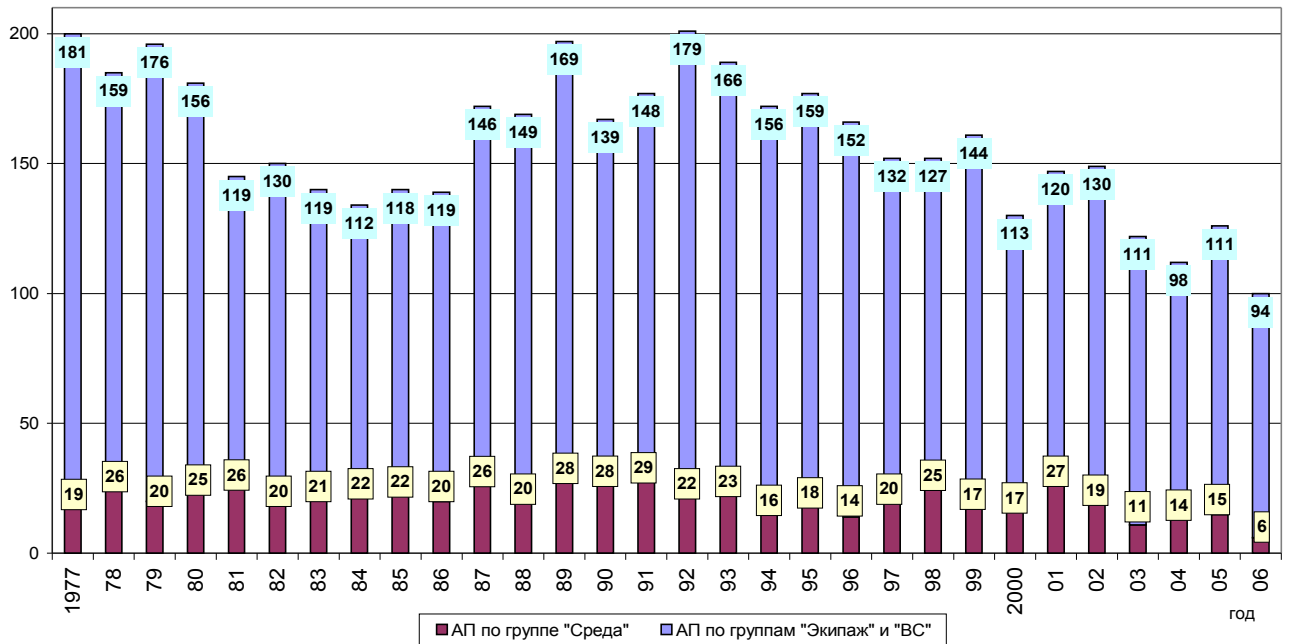


Рис. 2. Статистика авиационных происшествий за 1977-2006 гг. по данным FSF

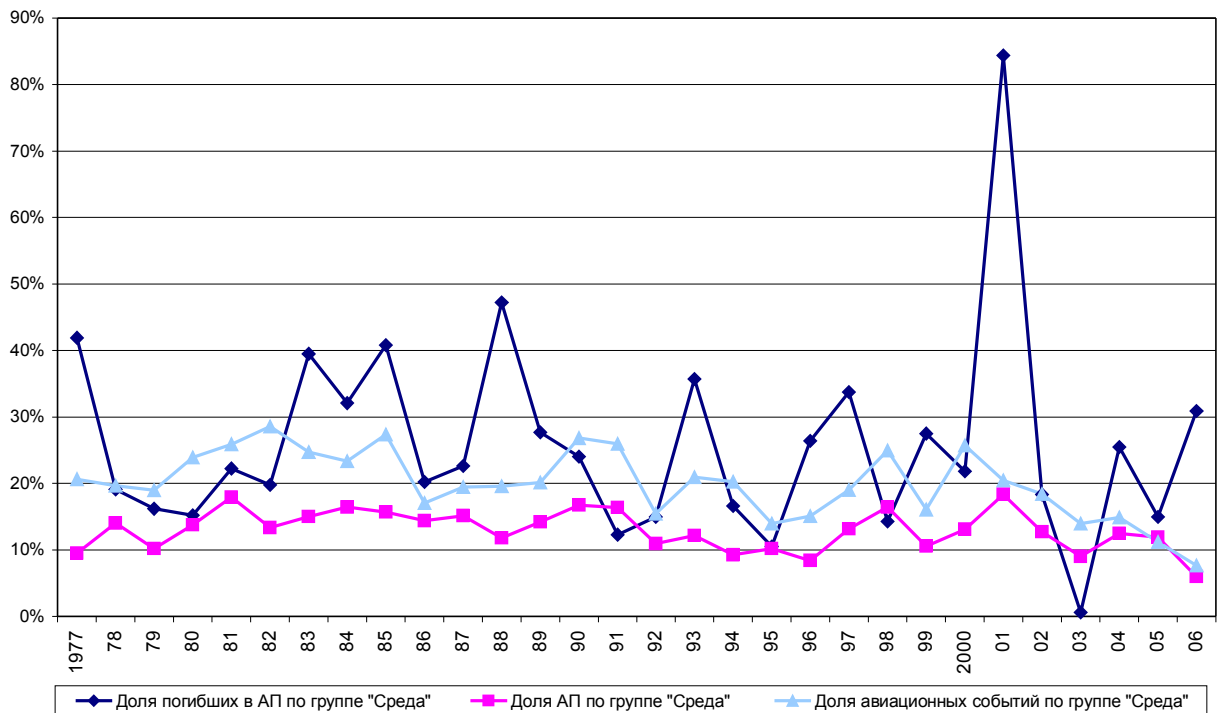


Рис. 3. Вклад группы факторов «Среды» в статистику авиационных событий в процентах от общего количества

Составление СОС для получения синтезированной функции оценки уровня БП в предстоящих полетах может выполняться с учетом особенностей деятельности эксплуатанта: регионов полетов, вида выполняемых работ, парка ВС, предыдущего опыта и т. д. На рис. 4 представлен возможный вариант структуры системы. В качестве ИС

выбраны четыре фактора: $z_1, -z_4$, семь других отнесены к ИУ. Логическим блоком «и» обозначены конъюнкции, а блоком «или» - дизъюнкции соответствующих ИС и ИУ.

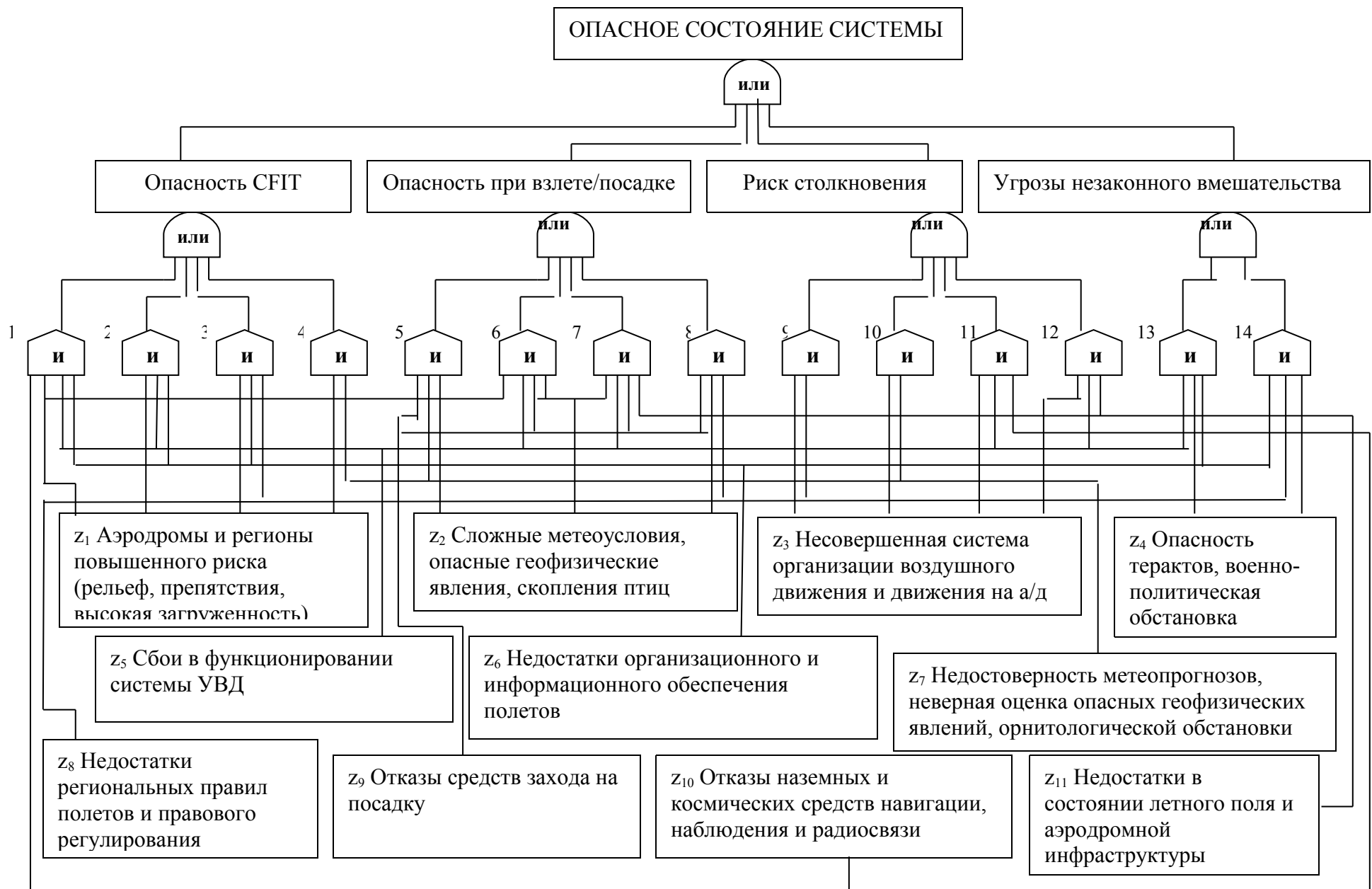


Рис. 4. Формирование опасного состояния по группе факторов «Среда»

Конъюнкции логических элементов по каждому логическому блоку «и» в соответствии с их нумерацией на рис 4 представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ блока	Логические переменные: ИС и ИУ
1	1,5,6,7
2	1,5,6,11
3	1,6,8
4	1,7
5	2,7,9
6	2,5,9,10
7	2,5,9,11
8	2,8,9
9	3,8
10	3,7
11	3,5,10
12	3,5,11
13	4,5,6
14	4,6,8

Дизъюнкции элементов на выходе четырех логических блоков «или» могут быть интерпретированы как показатели опасности четырех групп АП, в которых факторы среды играют важную роль. К первой группе относятся события, связанные с СФИТ. Вторую группу образуют АП при заходе на посадку и посадке. Столкновения ВС с другими ВС в полете и при несанкционированном занятии ВПП, столкновения с птицами, а также с транспортными средствами и препятствиями на аэродроме при рулении образуют третью группу. К четвертой группе относятся события, связанные с террористической деятельностью, актами незаконного вмешательства в управление ВС, а также случаи поражения гражданских ВС боевыми средствами.

Функция опасности системы ФОС записывается в виде логической матрицы, в которой конъюнкции обозначаются расположением логических символов в строке, а дизъюнкции – их расположением в столбце.

В данном случае имеем:

$$f(z_1, \dots, z_{11}) = \begin{array}{cccc} z_1 & z_7 & & \\ & z_6 & z_8 & \\ & & z_5 & z_{10} \\ & & & z_{11} \\ z_2 & z_9 & z_7 & \\ & & z_6 & \\ & & z_5 & z_{10} \\ & & & z_{11} \\ z_3 & z_7 & & \\ & z_6 & & \\ & z_5 & z_{10} & \\ & & z_{11} & \\ z_4 & z_6 & z_5 & \\ & & z_8 & \end{array} \quad (3)$$

Для выполнения процедуры полного замещения логических переменных z_i на вероятности их истинности в [2] разработаны различные алгоритмы: разрезания, ортогонализации, рекуррентный (или табличный), алгоритм наращивания путей. В данном случае применение рекуррентного алгоритма с использованием результатов работы [3] и компьютерного расчета позволяет получить решение в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 P(OC) = & Q_3Q_7 + Q_3S_7Q_8 + Q_1S_3Q_7 + Q_2S_3Q_8Q_9 + Q_4Q_5Q_6S_8 + Q_4S_3Q_6Q_8 + Q_3Q_5S_7S_8Q_{11} + \\
 & Q_1S_3S_4Q_6S_7Q_8 + S_1Q_2S_3Q_7S_3Q_9 + Q_3Q_5S_7S_8Q_{10}S_{11} + Q_2S_3Q_5S_7S_8Q_9Q_{11} + Q_1S_3Q_5Q_6S_7S_8S_9Q_{11} + \\
 & + Q_2S_3Q_5S_7S_8Q_9Q_{11} + Q_1S_3Q_5Q_6S_7S_8S_9Q_{11} + Q_2S_3Q_5S_7S_8Q_9Q_{11}S_{11} - [Q_1Q_2S_3Q_7Q_8Q_9 + \\
 & + Q_3Q_4Q_5Q_6Q_7S_8 + Q_2S_3Q_4S_6S_8S_9 + Q_1S_3Q_4Q_6Q_7Q_8 + Q_1S_3Q_4Q_5Q_6Q_7S_8 + Q_3Q_4Q_5Q_6S_7S_8Q_{11} + \\
 & + Q_1Q_2S_3Q_4Q_6Q_7Q_8Q_9 + Q_1Q_2S_3S_4Q_3S_7Q_8Q_9 + Q_3Q_4Q_5Q_6S_7S_8Q_{10}Q_{11} + S_1Q_2S_3Q_4Q_5Q_6Q_7S_8Q_9 + \\
 & + Q_2S_3Q_4Q_3Q_6S_7S_8Q_9Q_{11} + Q_1Q_2S_3S_4Q_3Q_6S_7S_8Q_9Q_{11} + Q_2S_3Q_4Q_5Q_6S_7S_8Q_9Q_{10}S_{11} + \\
 & + Q_1Q_2S_3S_4Q_5Q_6S_7S_8Q_9Q_{10}S_{11}],
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где Q_i - исходные вероятности истинности или «опасности» аргументов системы (3);

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

Из выражения (4) при известных исходных данных и вычисляется вероятность перехода АТС в опасное состояние по группе факторов «Среда» в предстоящем полете. Полученное значение $P(OC)$ сравнивается со средним («фоновым») значением. Исходя из результата, принимается решение о степени опасности предстоящего полета и принятии дополнительных мер по снижению риска. Такие меры силами эксплуатанта, очевидно, могут быть реализованы главным образом по группе факторов «Экипаж» и лишь в некоторой степени по группам «Среда» и «ВС». Оценка эффективности этих мероприятий может быть проведена по методике, изложенной в [5].

Получение пригодных для использования исходных вероятностей Q_i является отдельной и сложной задачей. Очевидно, что если рассматривать ОС как имеющую различные стадии [4] эти вероятности для одного и того же ИС (ИУ) будут также разными. Существующие подходы и накопленный статистический материал позволяют оценить лишь риски, названные в [6] стохастическими и детерминированными. Для значительного числа факторов среды эта проблема не решена и требует дополнительных исследований.

Однако ЛВТБ позволяет получить чрезвычайно важный результат - оценить вклады (или «весовые характеристики») каждого из ИС и ИУ в итоговое значение $P(OC)$ – и без известных значений Q_i . Такая оценка основана на том, что «вес» аргумента в монотонной булевой функции есть частный случай его «значимости» при одинаковой опасности всех аргументов, равной 0,5. Вычисление «значимости» g_{z_i} аргументов выполняется по следующей расчетной формуле:

$$g_{z_i} = \sum_{f=1}^k 2^{-(r_f-1)} - \sum_{j=1}^l 2^{-(r_j-1)}, \tag{5}$$

где k, r_f - число и ранг ортогональных конъюнкций, содержащих аргумент z_i ;

l, r_j - число и ранг ортогональных конъюнкций, содержащих логическое отрицание z_i^l .

Полученное по формуле (5) распределение g_{Q_i} для рассматриваемой ОС представлено в табл. 2.

Таблица 2

g_{z1}	g_{z2}	g_{z3}	g_{z4}	g_{z5}	g_{z6}
0,181	0,105	0,137	0,0680	0,171	0,147
g_{z7}	g_{z8}	g_{z9}	g_{z10}	g_{z11}	g_{Qc}
0,306	0,235	0,104	0,033	0,033	0,695

Используя данные табл. 2, даже не имея представления о вероятностях ИС и ИУ можно сделать определенные выводы.

Из четырех ИС самым опасным является наличие особых геофизических условий региона полетов и аэродромов (сложный рельеф, наличие препятствий, особенности трасс и аэродромов, высокая интенсивность полетов и т. д.). Этот результат не вызывает удивления и подтверждается опытом.

Среди ИУ наибольшим весом обладает недостоверность прогнозирования метеоусловий, опасных метео и геофизических явлений и орнитологической обстановки. Этот результат был бы неочевиден без проведенного анализа и является хорошей подсказкой для разработки превентивных мероприятий.

Далее следуют несовершенство правил полетов в регионе и недостатки правового регулирования, а также сбои в системе УВД. Этот вывод также не вполне очевиден и указывает на имеющиеся резервы повышения БП в части более глубокого изучения особенностей правил полетов в регионе, комплексного применения навигационных средств, повышения внимания к вопросам авиационной безопасности.

Выводы

1. Применение хорошо разработанного математического аппарата логико-вероятностной теории безопасности (ЛВТБ) позволяет сформировать синтезированную функцию оценки опасности сложной динамической авиационно-транспортной системы, как по группе факторов «Среда», так и по системе в целом.

2. Даже при отсутствии исходных вероятностей инициирующих событий и условий ЛВТБ позволяет объективно выявлять наиболее опасные места, причины и инициирующие условия, побуждая специалистов концентрировать усилия на решении первостепенных задач.

3. Учитывая сложность авиационно-транспортной системы, практическое применение ЛВТБ возможно только с использованием ЭВМ на базе имеющегося и перспективного специального программного обеспечения.

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

Литература

1. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). (Дос 9859-AN/460). Первое издание-2006 год. – ИКАО, 2006.

2. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – С. 248.

3. Можяев А. С., Алексеев А. О., Громов В. Н. Автоматизированное логико-вероятностное моделирование технических систем (Руководство пользователя ПК АСМ версии 5,0). – СПб.: Военный инженерно-технический университет, 1999. – С. 63.

4. Гузий А. Г., Онуфриенко В. В. Методология предотвращения авиационных происшествий через активное управления уровнем безопасности предстоящих полетов.// Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. № 3, 2006. – М.: ВИНТИ, 2006, с. 52 - 60.

5. *Гузий А. Г., Шаров В. Д.* Методологический подход к априорной оценке эффективности мероприятий по предотвращению авиационных происшествий // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. № 6, 2006. – М.: ВИНТИ, 2006, с. 76 - 79.

6. Шаров В. Д. Общие подходы к идентификации и оценке риска авиационного происшествия по группе факторов «Среда» // Проблемы безопасности полетов. Вып. 2, 2007. – М.: ВИНТИ, 2007, с. 21 - 30.