

УДК 629.735.33:004.021

ББК 39

## **ПРИМЕНЕНИЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СОБЫТИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ**

**Шаров В. Д.<sup>1</sup>**

(ООО «Волга–Днепр–Москва», Москва)

*В разрабатываемой для авиакомпании «Волга–Днепр» автоматизированной системе прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий используется метод вероятностного анализа безопасности с построением «деревьев событий». Вероятности инициирующих событий нижнего уровня оцениваются по данным различной природы. В процессе деятельности авиакомпании в систему поступает дополнительная информация в виде результатов аудитов, расследований событий, обязательных и добровольных сообщений, которые свидетельствуют о проявлениях факторов опасности, влияющих на вероятности событий. В статье описан метод использования этой информации для уточнения исходных вероятностей на основе известной формулы Байеса.*

Ключевые слова: безопасность полетов, фактор опасности, априорная вероятность события, апостериорная вероятность.

---

<sup>1</sup> Валерий Дмитриевич Шаров, кандидат технических наук, заместитель директора департамента предотвращения авиационных происшествий (v.sharov@volga-dnepr.com).

## **1. Введение**

Современная концепция обеспечения безопасности полетов (БП), закреплённая в Стандартах и Рекомендуемой практике Международной организации гражданской авиации (ИКАО), предусматривает разработку и внедрение на уровне авиакомпании системы управления БП (СУБП). Однако соответствующее руководство ИКАО [6] содержит только общие рекомендации по построению такой системы. Поэтому как российские, так и зарубежные авиакомпании разрабатывают собственные СУБП, наиболее известные описаны в монографии [2].

Авиакомпания «Волга–Днепр» совместно с Ульяновским государственным университетом инициировала разработку автоматизированной системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий (АСППАП) в рамках реализации Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010. К участию в работе приглашены ведущие ученые страны в области управления безопасностью полетов, риск-менеджмента, «человеческого фактора», организационно-экономического моделирования [1]. При разработке системы использованы современные подходы к управлению рисками [5].

## **2. Оценка вероятности авиационного происшествия**

Оценка вероятности АП в разрабатываемой системе выполняется на основе моделирования развития авиационных событий (АС) в полете в виде 12 «деревьев» – логических схем [7]. Эти схемы отражают возможные сценарии развития события от инициирующих событий или проявлений факторов опасности и их комбинаций через промежуточные события и барьеры безопасности к АП определенного типа например: выкатыванию за пределы ВПП, потере управляемости в полете, столкновению двух ВС в воздухе и др. На основе математического описания причинно-следственных связей «деревя» формируется модель прогнозирования вероятности АП.

На нижнем уровне деревьев развития событий выделенных типов располагаются инициирующие события и условия, называемые факторами опасности (ФО). Например, к ФО в дереве события типа «Небезопасное касание ВПП» относятся такие разные категории событий и условий, как «Отказ светосигнального оборудования ВПП», «Наличие на взлете зоны турбулентности», «Ошибка экипажа в установке давления на высотометре», «Отказ блоков управления закрылками», «Отклонение пилота: пониженная скорость пролета порога ВПП». Всего в АСППАП насчитывается около пятисот ФО, разделенных на три группы: «Человек», «Машина», «Среда».

По общей логике АСППАП вначале на основе разных наборов исходных данных оцениваются так называемые «базовые вероятности факторов опасности». В качестве таких данных используется статистика авиационных событий в отрасли (статистика авиакомпании мала), статистика отказов систем и агрегатов в авиакомпании, записи параметров пилотирования и работы систем самолета бортовыми самописцами, а также записи радиообмена экипажа с диспетчером, метеопрогнозы, тактико-технические данные систем и агрегатов, результаты исследований по операторским ошибкам и др.

Для многих ФО по группам «Человек» и «Среда» выполняется корректировка вероятностей на основе результатов специальных исследований и экспертных оценок. Например, базовые вероятности по группе «Человек» – это вероятности ошибок данного пилота «в среднем» на основе его 50 последних полетов. В конкретном полете вероятности этих ошибок могут существенно отличаться от средних за счет продолжительности полета, региона полета, накопленной усталости, психологической обстановки в кабине и других факторов.

Базы данных по статистике инцидентов в отрасли, экспертные оценки, характеристики экипажей, аэродромов, маршрутов и ВС постоянно обновляются. Тем не менее, полученные с помощью описанных процедур вероятности ФО не в полной мере учитывают текущую деятельность авиакомпании, что

является существенным недостатком с позиции конкретного эксплуатанта.

### **3. Постановка задачи уточнения вероятности фактора опасности**

Для ответственных руководителей, занимающихся вопросами обеспечения БП, важно, чтобы модель оценки вероятности оперативно реагировала и на незначительные события и отклонения, происходящие в конкретной авиакомпании. В рекомендациях ИКАО по построению СУБП [6] большое внимание уделяется также использованию результатов аудитов, инспекторских проверок. Важным элементом СУБП является информация о недостатках в области обеспечения БП, полученная от сотрудников авиакомпании по так называемой «системе добровольных сообщений». В разрабатываемой АСППАП должна быть задействована и эта система.

Возникает необходимость разработки дополнительного механизма учета этой важной информации. Предлагается разработать его на основе широко применяемой для решения подобных задач формулы Байеса.

Будем рассматривать вероятность ФО, полученную с помощью одной из процедур, кратко описанных выше, как априорную оценку. Полученная дополнительная информация используется для ее уточнения и получения апостериорной оценки.

### **4. Решение задачи**

Рассмотрим решение задачи на примере ФО «Попадание в спутный след другого ВС», который содержится в дереве события «Небезопасное касание ВПП».

Метод оценки вероятности данного ФО описан в [3]. В основе метода – анализ статистики этих событий и экспертное оценивание аэродрома по двум показателям: интенсивность полетов и качество управления воздушным движением по трехбалльной шкале. По интенсивности полетов аэродромы делятся

на аэродромы малой, средней и высокой интенсивности полетов. По качеству управления воздушным движением – на аэродромы с хорошим, удовлетворительным и неудовлетворительным качеством УВД. Модель рассчитана на самолет Ан-124-100. Принимается также, что впереди летящий самолет имеет категорию (а) по интенсивности спутного следа, т.е. его взлетная масса более 136т.

Значения вероятностей ФО для каждого из сочетаний значений этих параметров из [3] сведены в таблице 1.

Таблица 1. Оценка вероятности попадания в спутный след

Показатель интенсивности полетов	Показатель качества управление воздушным движением		
		Хорошее	Удовлетв.
Малая	0,000006	0,00009	0,00049
Средняя	0,00037	0,00584	0,025
Высокая	0,00158	0,0213	0,0777

Предположим, что для аэродрома  $X$  в предстоящем полете получена оценка вероятности  $P$ . Именно эта оценка и будет использована в дереве для прогнозирования вероятности события «Небезопасное касание ВПП». В то же время, стало известно, что на прошлой неделе поступило сообщение от экипажа, выполнявшего посадку на этом же аэродроме, о попадании в спутный след от ВС, заходившего на посадку перед ним. Очевидно, что оценка  $P$  должна быть скорректирована.

Предлагается подход к решению задачи с использованием формулы Байеса [4]:

$$(1) \quad P(A_i | B) = \frac{P(A_i)P(B | A_i)}{\sum_{i=1}^k P(A_i)P(B | A_i)},$$

где  $A_i$  – гипотезы относительно условий, в которых может произойти интересующее нас событие  $B$ ;  $A_i$  – попарно несовместные случайные события;  $P(A_i)$  – известные априорные вероятности

событий  $A_i$ ;  $P(B|A_i)$  – вероятность события  $B$  при условии, что наступит событие  $A_i$  (при справедливости гипотезы  $A_i$ ).

Формула позволяет вычислить условные вероятности  $P(A_i|B)$  событий  $A_i$  (или вероятность справедливости гипотез  $A_i$ ) на основании того факта, что событие  $B$  произошло (или не произошло).

В рассматриваемой задаче событие  $B$  – это попадание в спутный след. Условимся для исключения путаницы в дальнейшем оценку вероятности этого события называть «частотой».

Для упрощения дальнейших расчетов диапазон возможных (по таблице 1) вероятностей от  $10^{-1}$  до  $10^{-6}$  разбивается на интервалы с дискретностью  $10^{-1}$ . Событие  $A_i$  – это попадание частоты события  $B$  в один из интервалов. Все  $A_i$  образуют полную группу событий.

Принимается «пессимистический» вариант оценки: каждое значение вероятностей в таблице 1 округляется до левой (большей) границы соответствующего интервала логарифмической шкалы (см. таблицу 2).

Таблица 2. «Пессимистический» вариант оценки вероятностей

	Качество управления воздушным движением			
		Хорошее	Удовлетв.	Неудовлетв.
Интенсивность полетов	Малая	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$
	Средняя	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
	Высокая	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^{-1}$

Для получения распределения вероятностей для конкретного аэродрома проводится экспертное оценивание с участием 10 экспертов, результаты сведены в таблице 3.

Итоги опроса рассматриваем как два нечетких множества соответствующих значений параметров и записываем в виде

функций принадлежности  $A_1$  и  $A_2$ . Значения элементов нечетких множеств – первые буквы соответствующих характеристик.

$$A_1 = M/0,2 + C/0,8 + B/0,$$

$$A_2 = X/0,5 + Y/0,4 + H/0,1.$$

Произведение  $A = A_1 A_2$  записываем в виде матрицы, представляющей собой набор значений функции принадлежности нечеткого множества «Интенсивность полетов/Качество УВД» для аэродрома  $X$  (таблица 4).

Таблица 3. Экспертный опрос по аэродрому  $X$

Интенсивность полетов а/п ( $X$ )				Качество УВД а/п ( $X$ )			
	Малая	Средн.	Высокая		Хор	Удовл.	Неуд
Э-1	1			Э-1	1		
Э-2		1		Э-2	1		
Э-3	1			Э-3	1		
Э-4		1		Э-4	1		
Э-5		1		Э-5		1	
Э-6		1		Э-6			1
Э-7		1		Э-7	1		
Э-8		1		Э-8		1	
Э-9		1		Э-9		1	
Э-10		1		Э-10		1	
Итог	0,2	0,8	0	Итог	0,5	0,4	0,1

На основании таблиц 2 и 4 строим априорное распределение вероятностей гипотез. Метод построения поясним на примере.

По таблице 2 для интенсивности полетов «Малая» и показателя качества УВД «Хорошее» левая граница интервала частоты события  $B$  «попадание в спутный след» составляет  $10^{-5}$ , а правая, соответственно,  $10^{-6}$ .

Таблица 4. Функция принадлежности нечеткого множества  $A=A_1 A_2$

	Качество управления воздушным движением			
		Хорошее	Удовлетв.	Неудовлетв.
Интенсивность полетов	Малая	0,10	0,08	0,02
	Средняя	0,40	0,32	0,08
	Высокая	0	0	0

По таблице 4 имеем: степень принадлежности элемента «Малая/Хорошее» для аэродрома  $X$  равна 0,1. Принимаем, что степень принадлежности равна вероятности попадания частоты события  $B$  в интервал частоты  $(10^{-5}; 10^{-6})$ , который соответствует малой интенсивности и хорошему качеству УВД в таблице 2.

В интервал  $(10^{-3}, 10^{-4})$  попадают два элемента нечеткого множества: «Малая/Неудовлетв» и «Средняя/Хорошее». Соответственно, вероятность попадания события в данный интервал принимается равной сумме степеней принадлежности  $0,4 + 0,02 = 0,42$ .

Аналогично рассчитанные вероятности для других интервалов частот (гипотез) сведены в таблице 5, график показан на рис. 1.

Таблица 5. Априорные вероятности событий  $A_i$  на  $a/\delta X$

Гипотезы	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
Левая граница интервала	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
Вероятность попадания частоты события $B$ в интервал	0,08	0,32	0,42	0,08	0,1



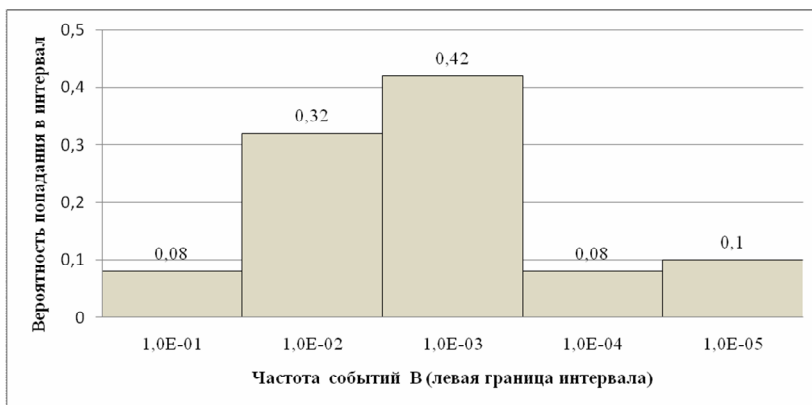


Рис. 1 Априорное распределение вероятностей событий  $A_i$

Средняя вероятность может быть рассчитана как

$$(2) \quad P = M(f) = \sum_{i=1}^n f_i^c P_i(A|B),$$

где  $M(f)$  – математическое ожидание распределения частот;  $f_i^c$  – левая граница частоты для  $i$ -го интервала;  $P_i(A|B)$  – вероятность для  $i$ -го интервала.

Имеем среднюю априорную «пессимистическую» вероятность попадания в спутный след на аэродроме  $X$ :  $P = 0,0124$ .

Поступило сообщение о том, что в а/п  $X$  имело место попадание ВС в спутный след другого ВС на посадке.

Рассмотрим два варианта.

(I) Ранее было выполнено 100 посадок на данном аэродроме, и случай попадания в спутный след – первый и единственный.

(II) Посадка, в которой отмечено попадание в спутный след, была первой посадкой нашего ВС на данном аэродроме.

Необходимо рассчитать условные вероятности  $P(B|A_i)$ .

По формуле биномиального распределения [4] вероятность наступления  $a$  событий в  $k$  испытаниях:

$$(3) \quad P(B = a) = \binom{k}{a} p^a (1 - p)^{k-a},$$

где  $p$  – вероятность наступления события  $B$  в одном испытании;

$$\binom{k}{a} = \frac{k!}{a!(k-a)!} \text{ – число сочетаний из } k \text{ элементов по } a.$$

Пример расчета.

Для варианта (I) – одно событие на 100 полетов – имеем  $k = 100, a = 1$ .

Принимаем, что при условии выполнения гипотезы события  $A_1$  вероятность для события  $B$  равна значению левой границы интервала или  $f_l$ ; так, для гипотезы  $A_1$  вероятность  $p = f_l = 0,08$ .

Если бы частота находилась в интервале от 0,1 до 0,01, то вероятность попадания в спутный след была бы равна:

$$P(B|A_1) = \frac{100!}{1!(100-1)!} 0,08^1 (1-0,08)^{100-1} = 100 \times 0,08 \times 0,92^{99} = 0,0003.$$

Результаты расчета по формуле (2) для вариантов (I) и (II) сведены в таблицу 6.

Таблица 6. Условные вероятности события  $B$  при выполнении гипотез  $A_i$

		Гипотезы				
		$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
Лев. граница интервала		0,1	0,01	0,001	0,0001	0,00001
$P(B A_i)$	(I)	0,00030	0,36973	0,09057	0,00990	0,0010
	(II)	0,1	0,01	0,001	0,0001	0,00001

Далее производим вычисления по формуле (1). Апостериорное распределение вероятностей для вариантов I и II приведено на графиках рис. 2 и 3.



Рис. 2 Апостериорное распределение, вариант I

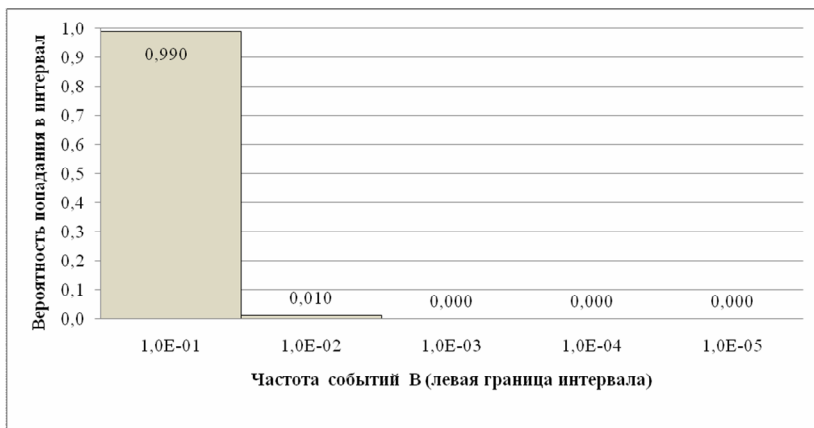


Рис. 3 Апостериорное распределение, вариант II

Как видно из рис.2 и 3, распределение вероятностей для частоты события В существенно изменились.

Расчет уточненного точечного значения частоты события (оценка вероятности ФО в предстоящем полете) по формуле (2) дает следующие результаты:

– для варианта I (одно сообщение о попадании в спутный след на 100 полетов)  $P_1(B)=0,01$ .

– для варианта II (сообщение о попадании в спутный след поступило при первом полете на данный аэродром)  $P_2(B)=0,099$ .

Как видим, дополнительная информация несколько уменьшила априорную вероятность  $P=0,0124$  для варианта (I) и существенно увеличила ее для варианта (II).

## **5. Заключение**

Описанный подход можно применить для всех ФО, которые могут уточняться по информации о производственной деятельности. Очевидно, что наряду с математическим ожиданием частоты могут быть использованы и другие оценки, например, верхние границы доверительных интервалов.

Отдельное исследование потребуется по учету серьезности события и степени доверия к дополнительной информации. Можно, например, считать достоверные сообщения за полноценное событие и учитывать их в расчетах как 1, менее достоверные – как долю от 1, например, 0,5; 0,3; 0,1 и т. д.

В АСППАП предлагается реализовать следующий порядок выполнения коррекции априорных вероятностей.

1. Если уточняющей информации нет – корректировать через каждые 50 полетов на данный аэродром ( $k = 50n$ ,  $n = 1, 2, \dots; a=0$ ).

2. Если информация поступает – коррекция выполняется немедленно. Но в этом случае, если апостериорная вероятность получится меньше, чем априорная на момент поступления информации, эта апостериорная вероятность отбрасывается и для расчетов события (в данном случае события «Потеря управляемости») используется априорная вероятность на следующие 50 полетов.

Предлагаемый сравнительно простой метод позволит учесть при прогнозировании важную дополнительную информацию по текущей эксплуатационной деятельности авиапредприятия.

Постоянная автоматизированная коррекция априорных вероятностей на основе поступающей информации о проявлениях факторов опасности позволит существенно повысить качество прогнозирования авиационных происшествий в АСППАП с целью принятия своевременных мер для их предотвращения.

### **Литература**

1. БУТОВ А.А., ВОЛКОВ М.А., ШАРОВ В.Д. *Принципы разработки системы прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок* // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Том 14, №4(2). – С. 386–393.
2. ЗУБКОВ Б.В., ШАРОВ В.Д. *Теория и практика определения рисков в авиапредприятиях при разработке системы управления безопасностью полетов*. – М.: МГТУ ГА, 2010. – 196 с.
3. НТО по договору № 13.П25.31.0063 от 22.10.2010 между ООО «Авиакомпания Волга–Днепр» и Минобрнауки РФ, шифр «2010-218-02-068», по теме «Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок», Госрегистрация №012011518 от 12.01.2011. Этап 3. Приложение А.
4. ОРЛОВ А.И. *Вероятность и прикладная статистика: основные факты: справочник*. – М.: КНОРУС, 2010. – 192 с.
5. ОРЛОВ А.И., ПУГАЧ О.В. *Подходы к общей теории риска / Управление большими системами*. – 2012. – №40. – С. 49–82.
6. *Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП)*. (Дос 9859-AN/460). Второе издание. – ИКАО, 2009. – 316 с.

7. ШАРОВ В.Д., МАКАРОВ В.П. *Методология применения комбинированного метода FMEA-FTA для анализа риска авиационного события* // Научный вестник МГТУ ГА, серия Эксплуатация воздушного транспорта. Безопасность полетов. – 2011. – №174. – С. 18–24.

## **APPLICATION OF BAYESIAN APPROACH TO UPDATE EVENTS' PROBABILITIES IN AUTOMATED SYSTEM OF AVIATION ACCIDENTS FORECASTING AND PREVENTION**

**Valeriy Sharov**, Volga–Dnepr Group, Moscow, Cand Sc, deputy director of aviation accident prevention department (v.sharov@volga-dnepr.com).

*Abstract: In the automated system of aviation accidents forecasting and prevention, which is being developed for Volga-Dnepr air carrier, the method of probabilistic analysis of safety with construction of "event trees" is used. Probabilities of initiating events at the lowest level of a tree are estimated using the data from various sources. In the course of company's operation additional information arrives to the system in the form of audit reports, cases investigations reports, and other obligatory and voluntary messages. These reports testify occurrence of danger factors influencing events' probabilities. We suggest the method of using this information for probabilities update on the basis of Bayes formula.*

Keywords: flight safety, danger factor, a priori probability, a posteriori probability.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии В.В. Ключковым  
Поступила в редакцию 29.01.2013.  
Опубликована 31.05.2013.*