

Применение байесовского подхода для уточнения вероятностей событий в автоматизированной системе прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий

Шаров В. Д.¹

(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.

1. Введение

Современная концепция обеспечения безопасности полетов (БП), закреплённая в Стандартах и Рекомендуемой практике

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

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 авиакомпании как российские, так и зарубежные 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 ученых 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. Тип событий – непосредственно наблюдаемые обстоятельства особой ситуации с воздушным судном (ВС) на земле или в воздухе, например: выкатывание за пределы ВПП, потеря управляемости в полете, столкновение двух ВС в воздухе и др. На основе математического описания причинно-следственных связей «дерева» формируется модель прогнозирования вероятности АП.

На нижнем уровне деревьев развития событий выделенных типов располагаются инициирующие события или факторы опасности (ФО).

Под ФО здесь понимается состояние, объект или деятельность, которые могут вызвать последствия, опасные для персонала, пассажиров, воздушных судов грузов и оборудования. Например, к ФО по типу события «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 высотомере», «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 авиакомпаний 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

Очевидно, что модель оценки вероятности должна оперативно реагировать 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 3-х бальной шкале. По интенсивности полетов оценки 1, 2, 3 обозначают аэродромы малой, средней и высокой интенсивности полетов соответственно. По качеству управления воздушным движением оценки 1, 2, 3 обозначают высокое, среднее и низкое качество соответственно.

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

Таблица 1 Оценка вероятности попадания в спутный след

Показатель ин-тенсивности полетов	Показатель качества управление воздушным движением			
		1	2	3
	1	0,000006	0,00009	0,00049
	2	0,00037	0,00584	0,025
	3	0,00158	0,0213	0,0777

При обработке результате экспертного опроса оценки аэродромов могут быть дробными, в этом случае выполняется интерполяция приведенных оценок.

Предположим, что для аэродрома X в предстоящем полете получена оценка вероятности $P=0,0012$. 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 $P=0,0012$ должна быть скорректирована.

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

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

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».

Предположим, что весь диапазон возможных частот разбит на интервалы. Событие A_i – это попадание частоты события B в один из интервалов. Все A_i образуют полную группу событий.

Возможный вид распределения вероятностей частот для принятого в примере значения $P(B)=0,0012$ представлен в табл.2 и на рис. 1.

Таблица 2 Априорные вероятности событий A_i

Гипотезы	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
Интервал частоты события B	10^{-1} - 10^{-2}	10^{-2} - 10^{-3}	10^{-3} - 10^{-4}	10^{-4} - 10^{-5}	10^{-5} - 10^{-6}	10^{-6} - 10^{-7}
Вероятность попадания частоты события B в интервал	0,005	0,152	0,422	0,262	0,113	0,044

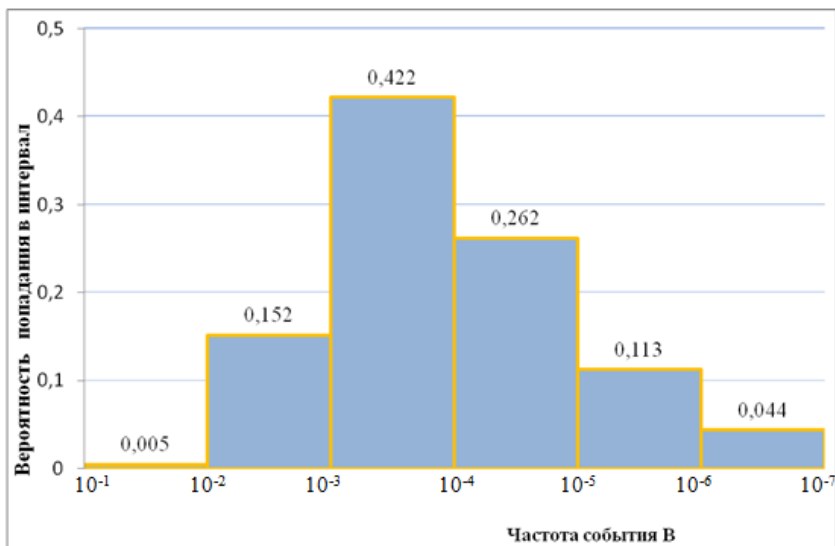


Рис. 1 Априорное распределение вероятностей событий A_i

Поступило сообщение о том, что имело место попадание ВС в спутный след другого ВС на посадке.

Рассмотрим два варианта;

(I) Ранее было выполнено уже 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:

$$P(B = a) = \binom{k}{a} p^a (1 - p)^{k-a}, \quad (2)$$

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 середины интервала или f_{cp} , так, для гипотезы A_1 вероятность $p=f_{cp}=0,05$

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

$$P(B/A_1) = \frac{100!}{1!(100-1)!} 0,05^1 (1-0,05)^{100-1} = 100 \times 0,05 \times 0,95^{99} = 0,03116$$

Результаты расчета по формуле (2) для вариантов (I) и (II) сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Условные вероятности события B при выполнении гипотез A_i

Гипотезы		Гипотезы					
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
Ср. частота интервала f_{cp}		5×10^{-2}	5×10^{-3}	5×10^{-4}	5×10^{-5}	5×10^{-6}	5×10^{-7}
$P(B/A_i)$	(I)	0,031	0,304	0,047	0,0049	0,0005	$4,9 \times 10^{-7}$
	(II)	5×10^{-2}	5×10^{-3}	5×10^{-4}	5×10^{-5}	5×10^{-6}	5×10^{-7}

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

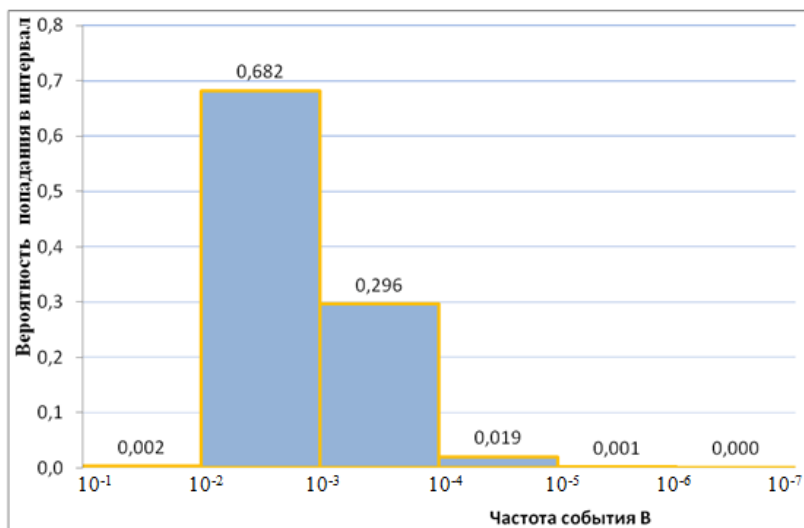


Рис. 2 Апостериорное распределение, вариант I

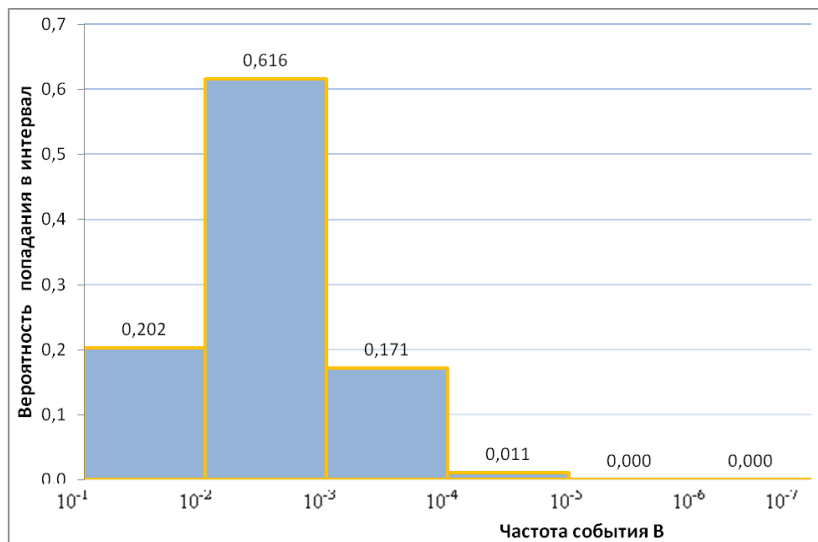


Рис. 3 Апостериорное распределение, вариант II

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

Уточненное точечное значение частоты события (оценка вероятности ФО в предстоящем полете) может быть рассчитано как математическое ожидание [4] частоты f по формуле:

$$M(f) = \sum_{i=1}^n f_i^c P_i(A|B) \quad (3)$$

где $M(f)$ – математическое ожидание для апостериорного распределения частот (уточненное значение вероятности ФО);

f_i^c – среднее значение частоты для i -го интервала;

$P_i(A/B)$ – апостериорная вероятность для i -го интервала.

Уточненные значения вероятности попадания в спутный след в предстоящем полете равны:

- для варианта 1 (одно сообщение о попадании в спутный след на 100 полетов) $P(B)=0,0037$;

- для варианта 2 (сообщение о попадании в спутный след поступило при первом полете на данный аэродром) $P(B)=0,013$.

Как видим, дополнительная информация может серьезно влиять на расчет вероятности (априорное значение 0,0012).

5. Заключение

Описанный подход можно применить для всех ФО, которые могут уточняться по информации о производственной деятельности. Очевидно, что могут быть использованы, наряду с математическим ожиданием частоты, 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 50 полетов на данный аэродром ($k=50$; $a=0$).
2. Если информация поступает – коррекция выполняется немедленно. При этом k - это количество полетов на данный аэродром с момента предыдущего сообщения, значение a устанавливается в интервале $(0, 1)$ в зависимости от достоверности сообщения и серьезности события.

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. Том 14 № 4(2), 2012, 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.-196с.
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», № госрегистрации 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. Выпуск 40. М.: ИПУ РАН, 2012. С.49-82.
6. *Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП).* (Дос 9859-AN/460). Второе издание-2009 год. – ИКАО, 2009.
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, №174, 2011. С.18-24.

USE OF BAYESIAN APPROACH TO SPECIFICATION OF THE PROBABILITIES OF THE EVENTS IN THE AUTOMATED SYSTEM OF FORECASTING AND PREVENTION OF AVIATION ACCIDENTS

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 forecasting and prevention of aviation accident developed for Volga-Dnepr airline the method of probabilistic analysis of safety with construction of "trees of events" is used. Probabilities of initiating events of the bottom level are estimated according to the various nature.

In the course of airline activity additional information in form of results of audits, investigations of events, obligatory and voluntary reports, arrives in system. This information testify to the manifestations of factors of danger influencing probabilities of events

In article the method of use of this information for specification of initial probabilities on the basis of Bayes formula is described.

Keywords: flight safety, danger factor, aprioristic probability of an event, a posteriori probability.