

Изменение вероятности прогнозирования авиационного события «Столкновение воздушного судна с птицей» в рамках изменения цикличности температуры

**В.Г. Бурмистрова¹, А.А. Бутов¹, М.А. Волков¹, М.С. Явтушенко¹, Б.М. Костишко¹,
М.Г. Москвичева¹, Ю.Ж. Пчелкина²**

¹Ульяновский государственный университет, Л.Толстого 42, Ульяновск, Россия, 432063

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московское шоссе 34, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В данной работе рассматривается возможность прогнозирования наиболее частого авиационного события «Столкновение воздушного судна с птицей» в зависимости от сезонности вблизи аэродрома. Предлагается модель определения вероятности этого события, где «время года» идентифицируется по прогнозируемой температуре воздуха вблизи рассматриваемого аэродрома. Рассмотрим первое приближение, в котором события предполагаются независимыми. Это сложные эколого-орнитологические условия и недостатки орнитологического обеспечения. В силу первого приближения независимости, в работе приводится возможный способ определения вероятности события «Столкновение воздушного судна с птицей». Данный способ (в виде формулы) определяет вероятность пересечения событий, вызванных факторами опасности. Результатом моделирования является возможность долгосрочного прогнозирования вероятности возникновения авиационного инцидента по причине столкновения воздушного судна с птицей.

1. Введение

В настоящей работе рассматривается возможность прогнозирования наиболее частого авиационного события «Столкновение воздушного судна с птицей» в зависимости от сезонности (в дальнейшем «время года») вблизи аэродрома. Предлагается модель определения вероятности этого события, где «время года» идентифицируется по прогнозируемой температуре воздуха вблизи рассматриваемого аэродрома.

Рассматривается первое приближение, в котором события предполагаются независимыми. Это сложные эколого-орнитологические условия и недостатки орнитологического обеспечения. В силу первого приближения, в работе приводится возможный способ определения (т.е. формула) вероятности события «Столкновение воздушного судна с птицей». Данная формула определяет вероятность пересечения событий, вызванных факторами опасности.

Результатом моделирования является возможность долгосрочного прогнозирования вероятности возникновения авиационного инцидента по причине столкновения воздушного судна с птицей.

Работа состоит из выполнения нескольких взаимосвязанных этапов:

1) построение модели прогнозирования авиационного события «Столкновения воздушного судна с птицей»;

- 2) построение модели изменения температуры;
- 3) построение модели долгосрочного прогнозирования авиационного события столкновения воздушного судна с птицей в соответствии с изменениями температуры.

Первая и вторая модели, рассматриваемые здесь, приводятся в [1,2]. Интерес представляет прогнозирование рассматриваемого события в долгосрочной перспективе. Рассмотрим подробнее каждый этап.

2. Модель прогнозирования авиационного события «Столкновения воздушного судна с птицей»

Согласно статистике авиационных событий основными факторами исследования являются «орнитологическая обстановка» и «недостатки орнитологического обеспечения аэродрома». Два этих показателя аэродрома относятся к факторам опасности при прогнозировании авиационного происшествия «Столкновение воздушного судна с птицей».

Сложность орнитологической обстановки определяется обстановкой и особенностью географического расположения аэродрома, в дальнейшем будем называть их уточняющими характеристиками факторов опасности. В данной работе предполагается оценивать каждую из этих уточняющих характеристик аэродрома по наиболее значимым показателям:

- эколого-орнитологическая обстановка - массовые утренние перелёты птиц, массовые вечерние перелёты птиц, осенние миграционные пути птиц, весенние миграционные пути птиц;
- особенности географического расположения аэродрома - наличие водоемов (рек, морей, болот, озер), наличие полей зерновых культур, скотоферм, свалок, зернопотоков, элеваторов.

В работе, эти две уточняющие характеристики предполагаются независимыми, так как, например, наличие водоема уже подразумевает увеличения количества птиц при различных перелетах.

Орнитологическая обстановка является определяющей при прогнозировании птиц в районе аэродрома и взлетно-посадочной полосы.

Обеспечение аэродрома в данной работе подразделяется на два значимых показателя: современное и несовременное. К первому, в настоящее время, можно отнести: аудиотелескопы, биоакустические установки, ультразвуковые установки, лазерные установки. Ко второму типу оборудования: механические птицеотпугиватели, ружья, трещетки, ракетницы и т.д. По наличию или отсутствию данного оборудования оценивается фактор опасности «недостаточное орнитологическое обеспечение аэродрома».

При разборе статистики авиационных происшествий по столкновению с птицей была выявлена взаимосвязь между сложной орнитологической обстановкой и недостатками орнитологического обеспечения, данная взаимосвязь позволила построить модель и определить метод прогноза авиационного происшествия столкновения с птицей.

Приведем построение математической модели, позволяющей осуществить формирование методики определения фактора опасности «Столкновение воздушного судна с птицей».

Рассмотрим вероятностное пространство (Ω, F, P) . Пространство элементарных исходов Ω представляет собой множество всех возможных сценариев развития событий, анализируемых в модели. Оценивается вероятность события (фактора опасности «Недостаточное орнитологическое обеспечение аэродрома») B^1 и события (фактора опасности «Сложная орнитологическая обстановка») B^2 .

Оценим вероятность P события B^1 , которое порождено набором значимых в данном исследовании показателей. В настоящем рассмотрении ими будут являться отсутствие или незнание о наличии вышеперечисленного орнитологического оборудования аэродрома. Значение вероятности события B^1 для каждого аэропорта уникально, представляет собой векторный набор φ^1 статистических показателей (характеристик) и коэффициентами значимости α^1 . Вектор φ_i^1 определяется экспертными оценками (в роли экспертов могут выступать люди знакомые с экологической обстановкой и орнитологией аэродрома). Эксперты вводят оценку каждого из показателей фактора опасности в виде цифры 1, 2 или 3. Чем меньше значение цифры, тем лучше. Цифра 2 означает то, что эксперт не знает о наличии данного

оборудования. Если по одному и тому же аэропорту предложено несколько экспертных оценок, то определяется среднее значение между оценками как мода. Тогда значение в векторном наборе для i -го аэродрома и j -го показателя (оборудования) принимается равным:

$$\varphi_i^{1j} = \frac{3 - \tilde{\varphi}_i^{1j}}{2}, \quad (1)$$

где $\tilde{\varphi}_i^{1j}$ - усредненная экспертная оценка показателя, $j=1,2$ - номер показателя для i -го аэродрома.

Коэффициенты значимости показывают вероятность невыполнения своей функции j -го оборудования, т.е.

$$P(\text{птица не реагирует} \mid \text{наличие } j\text{-го оборудования}) = \alpha^{1j} \quad (2)$$

Оценка вероятности события B^1 определяется как

$$P(B^1) = \min \{ \alpha^{11} I(\varphi_i^{11} > 0) + I(\varphi_i^{11} = 0), \alpha^{12} I(\varphi_i^{12} > 0) + I(\varphi_i^{12} = 0) \}, \quad (3)$$

где $I(*)$ индикаторная функция, равна 1 при выполнении условия, 0 – при не выполнении.

Предполагается, что фактор опасности «Недостаточное орнитологическое обеспечение аэродрома» является событием, отвергающее зависимости (точнее коррелированности) вектора входных данных и вектора коэффициентов значимости соответствующих данных.

Вероятность P события B^2 определяется как вероятность не пересекающихся событий наступления уточняющих характеристик: эколого-орнитологическая обстановка (в модели обозначается B^{21}), особенность географического расположения аэродрома (в модели обозначается B^{22}).

$$P(B^2) = P(B^{21} + B^{22}) = P(B^{21}) + P(B^{22}) - P(B^{21}) \cdot P(B^{22}) \quad (4)$$

Источники уточняющих характеристик определяются входными данными φ_i^{2j} , образующими векторный набор статистических показателей (характеристик) и коэффициентов значимости α^{2j} , где $j=1,2$ - номер уточняющей характеристики, i - определяет аэропорт. Для эколого-орнитологической обстановки четыре источника уточняющих характеристики, для особенности географического расположения аэродрома – три. Рассматриваемые статистические показатели предлагают эксперты. Они вводят оценку в виде цифры 1, 2, 3. Как и для предыдущего фактора опасности, оценка 3 показывает плохую ситуацию, для данного фактора – это наличие источников уточняющих характеристик. Для i -го аэропорта принимается мода экспертных оценок статистических данных. Векторный набор источников определяется как:

$$\varphi_{ik}^{2j} = \frac{\tilde{\varphi}_{ik}^{2j} - 1}{2}, \quad (5)$$

где $\tilde{\varphi}_{ik}^{2j}$ - усредненная экспертная оценка показателя, $j=1,2$ - номер уточняющей характеристики k -го источника для i -го аэродрома.

Коэффициенты значимости не привязаны к аэропорту, их значения определяют также экспертами:

$$P(\text{столкновение с птицей} \mid \text{наличие } k\text{-го источника}) = \alpha_k^{2j}, \quad (6)$$

где $j=1,2$ - номер уточняющей характеристики, k - количество источников, для $j=1$ четыре источника (массовые утренние перелёты птиц; массовые вечерние перелёты птиц; осенние миграционные пути птиц; весенние миграционные пути птиц), для $j=2$ - три (наличие водоемов (рек, морей, болот, озёр); наличие полей зерновых культур, скотоферм, свалок, зернопотоков, элеваторов; наличие других источников корма).

Среднее по экспертным оценкам определяется как среднеарифметическое.

При прогнозировании авиационного происшествия «Столкновение ВС с птицей» учитывается время суток и время года прогнозирования.

Тогда оценка вероятности события B^{21} для i -го аэропорта с учетом времени прогнозирования определяется как:

$$P(B^{21}) = \frac{\sum_{l=1}^4 \varphi_{il}^{21} \alpha_l^{21} \cdot I_l}{\left(\sum_{l=1}^4 (\varphi_{il}^{21} \cdot I_l)^{1/\lambda} \right)^\lambda \left(\sum_{l=1}^4 (\alpha_l^{21} \cdot I_l)^{1/\gamma} \right)^\gamma} \quad (7)$$

Данная оценка действительно лежит в интервале от 0 до 1 (согласно неравенству Гельдера) [3]. Коэффициенты γ и λ выбираются из значимости факторов опасности. Для этих коэффициентов выполняются выражения:

$$\gamma + \lambda = 1, \lambda \in [0,1], \gamma \in [0,1]. \quad (8)$$

На данный момент $\gamma = \lambda = 1/2$, эти коэффициенты у всех факторов опасности отличаются, сумма коэффициентов значимости не равна 1. Выбор параметра λ (и, соответственно, $\gamma = 1 - \lambda$) осуществляется перебором в диапазоне 0,1 - 0,9 с шагом 0,1 при опытной эксплуатации с целью максимизации соответствия прогноза $P(B^{21})$ апостериорным данным. Выражение (8) предполагает, что фактором опасности является событие, отвергающее зависимости (точнее коррелированности) вектора входных данных и вектора коэффициентов значимости соответствующих данных. В случае $\gamma = \lambda = 1/2$ оценка $P(B^{21})$ является эмпирической оценкой коэффициента корреляции. Отклонение значений γ и λ от 1/2 соответствует эмпирической оценке нормы Гельдера (см., например, [4,5]). Функция I_l является индикаторной функцией и равняется единице, если время прогнозирования соответствует источнику, например: время прогноза весна, индикатор источника весенние миграционные пути птиц будет равен 1.

Оценка вероятности события B^{22} определяется аналогично как для события B^{21} :

$$P(B^{22}) = \frac{\sum_{l=1}^3 \varphi_{il}^{22} \alpha_l^{22}}{\left(\sum_{l=1}^3 (\varphi_{il}^{22})^{1/\tilde{\lambda}} \right)^{\tilde{\lambda}} \left(\sum_{l=1}^3 (\alpha_l^{22})^{1/\tilde{\gamma}} \right)^{\tilde{\gamma}}} \quad (9)$$

Также как и в предыдущем случае:

$$\tilde{\gamma} + \tilde{\lambda} = 1, \tilde{\lambda} \in [1,0], \tilde{\gamma} \in [1,0]. \quad (10)$$

В данной работе, также как и в предыдущем случае, $\tilde{\gamma} = \tilde{\lambda} = 1/2$.

Вероятность фактора опасности «Сложная орнитологическая обстановка» B^2 определяется по формуле (4).

Вероятность возникновения авиационного события «Столкновение ВС с птицей» B , в соответствии с найденными значениями B^1, B^2 , определяется по формуле:

$$P(B) = P(B^2)(P(B^1))^{1/A}. \quad (11)$$

Выражение (11) представляет собой вероятность пересечения события B^1 и B^2 в первом приближении независимости. Выбор параметра A осуществляется перебором в диапазоне 0,1 - 10 с шагом 0,1 при опытной эксплуатации с целью максимизации соответствия прогноза $P(B)$ апостериорным данным.

3. Модель «Изменение температуры»

Рассмотрим математическую модель «Изменения температуры». Предполагается, что процесс значений температуры $X = (X_t)_{t \geq 0}$ является наблюдаемым. При этом сезонные изменения температуры предполагаются с некоторой (оцениваемой, но изначально не измеряемой, следовательно, не наблюдаемой) скоростью $Y = (Y_t)_{t \geq 0}$:

$$\begin{cases} dX_t = Y_t dt + dU_t, \\ dY_t = -\lambda(X_t - X_{mid})dt, \end{cases} \quad (12)$$

с начальными значениями X_0 и оцениваемым Y_0 . Здесь переменная λ определяет циклические изменения периодов сезона и находится (в первом линейном приближении) из соотношения: $\lambda = \omega^2$, $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (T - есть длина цикла). Среднее значение температуры за год определяется переменной X_{mid} .

Процесс $U = (U_t)_{t \geq 0}$ определяет волатильность значений температуры и (в первом линейном приближении) является процессом Орнштейна-Уленбека (т.е. стационарным гауссовским шумом с экспоненциально затухающей корреляционной функцией):

$$dU_t = -\mu U_t dt + \sigma dW_t, \quad U_0 = 0. \quad (13)$$

Дисперсия процесса $U = (U_t)_{t \geq 0}$ равна:

$$D_U(t) = D_U \cdot (1 - e^{-2\mu t}), \quad (14)$$

где $D_U = \frac{\sigma^2}{2\mu}$. Оценкой дисперсии является экспериментально определяемая (в силу эргодичности процесса Орнштейна-Уленбека) величина квадратичного отклонения, полученного по формуле:

$$D = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{[TN]} (\tilde{X}_{t_i} - x_i)^2 \Delta, \quad (15)$$

где X_i - экспериментальные значения за рассматриваемый период, $\Delta = \frac{1}{N}$ и N - дискретность

разбиения с $t_{i+1} - t_i = \Delta$. Процесс $\tilde{X} = (\tilde{X}_t)_{t \geq 0}$ является синусоидой и описывается системой:

$$\begin{cases} d\tilde{X}_t = \tilde{Y}_t dt, \\ d\tilde{Y}_t = -\lambda(\tilde{X}_t - X_{mid})dt, \end{cases}, \quad \tilde{Y}_0 = Y_0. \quad (16)$$

Значения параметров модели «Изменение температуры» с течением времени меняются незначительно. Так, например, если имеется статистика максимальных значений температур воздуха за последние 10 лет, то, очевидно, что спустя три месяца при пересчете этих параметров различия окажутся минимальными, [6]. Поэтому эти наборы параметров целесообразнее пересчитывать через достаточно большой промежуток времени и хранить в базе данных.

4. Модель долгосрочного прогнозирования авиационного события «столкновения воздушного судна» согласно изменению температуры

В модели прогнозирования авиационного события «столкновения воздушного судна с птицей» в формуле (7) индекс I_t характеризует время года. В данной работе предлагается определять значение I_t по модели «изменение температуры воздуха».

Рассмотрим дискретный аналог долгосрочного прогнозирования в рамках задачи: определить, когда в течение периода времени от S до $s+T$ вероятность возникновения авиационного происшествия пересечет установленный критический уровень. Модель строится с шагом Δ и в качестве первого приближения рассматриваются значения $T = 3$ года и $\Delta = 1$ (один день). На каждом интервале определяется вероятность авиационного события «столкновения воздушного судна с птицей» (которую в дальнейшем будем называть «мгновенной»). На основании полученных результатов строится функция распределения «мгновенной» вероятности (которую в дальнейшем будем называть «накопленной»).

Момент (обозначим ζ_s) достижения критического уровня «накопленной» вероятности (заранее известной константы) и является границей интервала критической вероятности $[s; \zeta_s]$. Долгосрочное прогнозирование позволяет провести оценивание вероятности того, что авиационное событие произойдет за время T (т.е. момент ζ_s находится на интервале $[s; s + T]$): $P\{\zeta_s \in [s; s + T]\}$.

5. Заключение

Прогноз, построенный по модели долгосрочного прогнозирования авиационного события «столкновения воздушного судна с птицей», позволяет предсказывать с установленной критической вероятностью даты наступления рассматриваемого авиационного события. Модель была адаптирована для некоторых аэропортов, при этом настройка параметров происходила в автоматическом режиме. Использование настоящей работы позволит снизить вероятность возникновения инцидентов, связанных со столкновением воздушного судна с птицей.

6. Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ проект № 19-42-730005 p_a.

7. Литература

- [1] Bazhanova, T.V. Forecasting Method Of Aviation Incident «BIRD STRIKE» / T.V. Bazhanova, V.G. Burmistrova, A.A. Butov, M.G. Moskvicheva // Nauka i studia (Przemysl). – 2015. – Vol. 5. – P. 57-63.
- [2] Бурмистрова, В.Г. Орнитологическое обеспечение аэродрома и безопасность эксплуатации воздушного судна / В.Г. Бурмистрова, А.А. Бутов, М.Г. Москвичева, Т.В. Шевченко // Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник научных трудов – Ульяновск: УлГТУ, 2018. – С. 40-45.
- [3] Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников – М.: Физматлит, 2006. – 813 с.
- [4] Воробьев, Ю.Л. Теория риска и технологии обеспечения безопасности. Подход с позиций нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, Н.А. Махутов // Проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 1990. – № 11. – С. 19-41.
- [5] Орлов, А.И. Графы при моделировании процессов управления промышленными предприятиями // Управление большими системами. Специальный выпуск. – 2010. – Т. 30, № 1. – С. 62-75.
- [6] Чернокульский, А.В. Аналитические оценки эффективности предотвращения потепления климата контролируемые аэрозольными эмиссиями в стратосферу / А.В. Чернокульский, А.В. Елисеев, И.И. Мохов // Метеорология и Гидрология. – 2010. – Т. 5. – С. 16-26.

Change in the probability of predicting the aviation incident «Bird Strike» (collision of an aircraft with a bird) in accordance with of a change in the temperature cycle

V.G. Burmistrova¹, A.A. Butov¹, M.A. Volkov¹, M.S. Yavtushenko¹, B.M. Kostishko¹,
M.G. Moskvicheva¹, Yu. Pchelkina²

¹Ulyanovsk State University, Lva Tolstogo Street 42, Ulyanovsk, Russia, 432063

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. In the article we consider the possibility of predicting the most frequent aviation incident «Bird Strike» (collision of an aircraft with a bird) depending on seasonality around the airfield. We suppose a model of determining the probability of this incident, where the “time of year” is identified by the predicted air temperature near the airfield in question. The result of the simulation is the possibility of long-term forecasting the likelihood of an aviation incident because of collision of an aircraft with a bird.