

ОБ ОЦЕНИВАНИИ ВЕРОЯТНОСТИ ФАКТОРОВ ОПАСНОСТИ, СВЯЗАННЫХ С ПРОГНОЗИРУЕМЫМИ МЕТЕОУСЛОВИЯМИ

В. Г. Бурмистрова¹, А.А. Бутов¹, А. В. Жарков¹, Ю.Ж. Пчёлкина²

¹ ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный университет», Ульяновск, Россия,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

За объект исследования в данной работе принимаются два метеофактора: горизонтальная и вертикальная видимость. С данными метеофакторами связаны «предельные уровни опасности», выход за пределы этих уровней (превышение или понижение) недопустимо или нежелательно. Начальные значения горизонтальной и вертикальной видимости принимаются равными величинам, представленных в метеопрогнозе погоды. Значения исследуемых метеофакторов моделируются с учетом оправданности прогноза (погрешностей и обеспеченности прогноза). В работе учитывается не только основная часть метеопрогноза, а также группа устойчивых и временных изменений прогноза. Основной задачей данной работы является определение вероятности того, что значения метеофакторов выйдут за «предельные уровни опасности». Решение данной задачи было найдено с учетом предположений, что конкретная реализация метеофактора в момент посадки (или взлета) является непрерывной случайной величиной со значениями на обычной количественной шкале и имеет нормальное распределение и, что рассматриваемые метеофакторы являются независимыми величинами. Результаты данной разработки можно применять при решении задач, связанных с авиационным прогнозированием, например, при принятии решении о вылете или посадки воздушного судна.

Ключевые слова: метеоминимумы, оценка вероятности, моделирование, прогноз.

Введение

Предположим, что $X(t)$ – некоторый метеофактор, содержащийся в фактической погоде (сводка METAR) или в прогнозе погоды (TAF) по аэродрому. Он представляет собой непрерывную размерную величину (отметка на количественной шкале). Под этим метеофактором будем понимать параметры: горизонтальная видимость (в метрах) при заходе воздушного судна на посадку или высота нижнего края облачности (в метрах) на аэродроме посадки [1].

Значение метеофактора $X(t)$ может содержаться как в основной части прогноза (обозначим его $X_{прог}$), так и в группе устойчивых изменений (они обозначаются ВЕСМГ, FM) либо в группе временных изменений (обозначаются ТЕМПО) иногда с указанием вероятности возможных изменений 40% (PROB40) или 30% (PROB30). Значение метеофактора содержащееся не в основной части метеопрогноза обозначим X_{tempo} .

С этим метеофактором связан «предельный уровень опасности» - значение $X_{опасн}$ выход за его пределы (превышение или понижение) недопустимо или нежелательно, значения данного уровня «предельный уровень опасности» определен по [2].

Основное предположение: конкретная реализация метеофактора $X(t)$ в момент посадки (или взлета) является непрерывной случайной величиной со значениями на обычной количественной шкале.

Основная задача: найти вероятность того, что значение $X(t)$ преодолет значение $X_{опасн}$, то есть либо $P = P\{X(t) > X_{опасн}\}$, либо $P = P\{X(t) < X_{опасн}\}$.

Будем называть P вероятностью выхода метеоусловий за границу безопасности.

Примем следующие предположения:

- распределение возможных реализаций $X(t)$ является нормальным с параметрами α и σ , ([3]-[4], возможно использование непараметрических методов);
- значение $X_{прог}$ является значением параметра α (то есть средним значением, а также модой (наибольшим значением) плотности распределения).
- значение σ получим из условий точности и статистической достоверности реализации прогноза.

Расчет оценок вероятностей метеоусловий

Обозначим $L(t)$ – горизонтальную видимость, которая может быть в реальной ситуации, она представляет собой случайную величину. Переменная $L_{прогн}$ задана по прогнозу в части ТАФ. Переменная горизонтальной видимости $L(t) \in N(L_{прогн}; \sigma)$ (имеет нормальное распределение с математическим ожиданием $L_{прогн}$ и дисперсией σ^2). Дисперсия определяется по обеспеченности и точности прогноза.

Согласно [5] имеем при видимости по прогнозу более 800 метров, погрешность равна 30% от прогноза и 80% по обеспеченности. В этом случае выполняется:

$$P\{|L(t) - L_{прогн}| < 0,3 \cdot L_{прогн}\} = 0,8 \quad (1)$$

Отсюда можно получить, что $\sigma = 0,23 \cdot L_{прогн}$.

Получаем, что в этой ситуации (прогноз видимости более 800 м) вероятность выхода метеоусловий за границу безопасности:

$$P\{L(t) < L_{опасн}\} = \Phi\left(4,27 \cdot \left(\frac{L_{опасн}}{L_{прогн}}\right) - 1\right) \quad (2)$$

Здесь Φ – функция стандартного нормального распределения.

Геометрическая иллюстрация формулы (2) показана на рисунке 1.

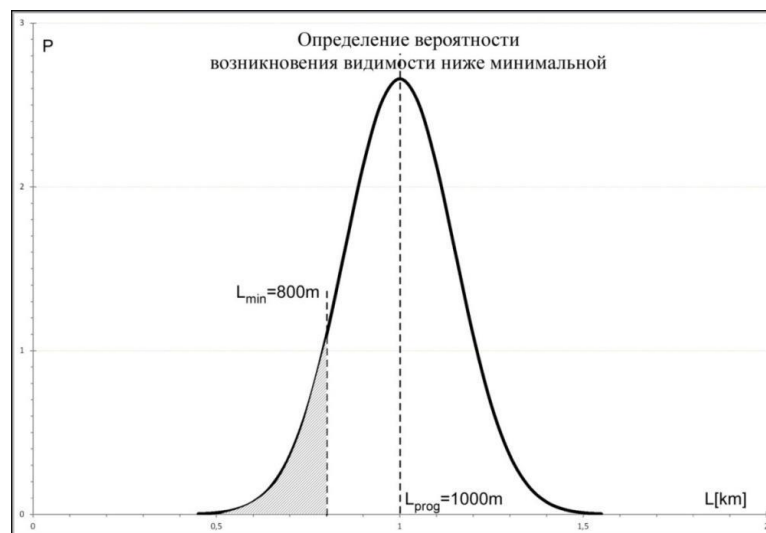


Рис. 1. Определение вероятности реализации видимости ниже минимальной

Если величина прогноза видимости менее 800 м, то погрешность равна ± 200 м, с учетом достоверности прогноза 80% и тогда выполняется:

$$P = P\{L_{\text{прогн}} - 200 < L(t) < L_{\text{прогн}} + 200\} = 0,8 \quad (3)$$

Отсюда получаем $\sigma = 156$ м.

Тогда вероятность возникновения «опасной» метеоситуации равна

$$P\{L(t) < L_{\text{опасн}}\} = \Phi\left(4,27 \cdot \left(\frac{L_{\text{опасн}}}{L_{\text{прогн}}}\right) - 1\right) \quad (4)$$

Обозначим реальное значение облачности $H(t)$, $H(t) \in N(H_{\text{прогн}}; \sigma)$, где $H_{\text{прогн}}$ – значение облачности по прогнозу. Прогноз высоты облачности $H(t)$ подразумевает, что погрешность равна $\pm 30\%$ от прогноза, если величина прогноза от 300 м до 3 км, и погрешность равна ± 30 м, если величина прогноза до 300 м.

Предположим, что прогноз до 300 м. С учетом достоверности прогноза 70%, потребуем:

$$P = P\{H_{\text{прогн}} - 30 < H(t) < H_{\text{прогн}} + 30\} = 0,7 \quad (5)$$

Отсюда получаем $\sigma = 29$ м.

Тогда вероятность возникновения «опасной» метеоситуации равна

$$P = P\{H(t) < H_{\text{опасн}}\} = \Phi\left(\frac{H_{\text{опасн}} - H_{\text{прогн}}}{\sigma}\right) \quad (6)$$

Если значение $H_{\text{прогн}}$ более 300 м, то по [2] выполняется 30% по точности и 70% по обеспеченности и актуально выражение:

$$P = P\{|H(t) - H_{\text{прогн}}| < 0,3 \cdot H_{\text{прогн}}\} = 0,7 \quad (7)$$

Отсюда можно получить, что $\sigma = 0,29 \cdot H_{\text{прогн}}$.

Вероятность возникновения «опасной» метеоситуации равна:

$$P = P\{H(t) < H_{\text{опасн}}\} = \Phi\left(3,46 \cdot \left(\frac{H_{\text{опасн}}}{H_{\text{прогн}}}\right) - 1\right) \quad (8)$$

При определении оценки выхода реализации метеоусловий за границу безопасности рассматриваются горизонтальная и вертикальная видимости. Обозначим вероятности выхода за «предельный уровень опасности» исследуемых метеофакторов как P_1 и P_2 . Рассматриваемые здесь показатели считаются независимыми величинами (так как рассматриваются погрешность и оправданность прогноза каждой величины), хотя как показатели погоды они зависимы. В связи с выше описанным, рассматриваем P_1 и P_2 как вероятности двух независимых событий и определяем итоговую вероятность блока «сложения» событий:

$$P(t) = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \quad (9)$$

Учет изменений метеоусловий. В прогнозе TAF может быть указатель возможных изменений (либо ВЕСМГ, либо FM, либо TEMPO). Если изменений не прогнозируется, то может присутствовать указатель NOSIG. В случае присутствия указателя TEMPO, следует получить из метеопрогноза величину L_{tempo} .

Появление указателя TEMPO с обязательным указанием периода его действия от T_1 до T_2 означает, что на этот период в данном месте возникает смесь двух погод: одна с характеристиками из основного прогноза, другая – из прогноза изменений. Вероятность встретить в момент прилета воздушного судна погоду из TEMPO равна

$$p_0 = \begin{cases} 0,5, & \text{если указано TEMPO без PRPOB;} \\ 0,4, & \text{если указано TEMPO с PRPOB40;} \\ 0,3, & \text{если указано TEMPO с PRPOB30;} \end{cases} \quad (10)$$

Соответственно вероятность встретить погоду, указанную в основном прогнозе, равна $(1 - p_0)$.

Прогноз ВЕСМГ заменяет основной прогноз со времени T_2 , если происходит улучшение погодных условий; со времени T_1 , если происходит ухудшение погодных условий, с вероятностью достоверности прогноза 80%.

Например, пусть в основном прогнозе указана величина дальности видимости $L_{\text{прогн}}$ (тогда реальная видимость – случайная величина, нормально распределенная с параметрами $\alpha = L_{\text{прогн}}$ и $\sigma_1 = \lambda \cdot L_{\text{прогн}}$), а в прогнозе TEMPO величина дальности видимости L_{tempo} (то есть новая прогнозируемая видимость – случайная величина, нормально распределенная с параметрами $\alpha = L_{\text{прогн}}$ и $\sigma_1 = \lambda \cdot L_{\text{прогн}}$).

Тогда вероятность возникновения «опасной» метеоситуации равна

$$\begin{aligned}
 P = P\{L(t) < L_{опасн}\} = p_0 \cdot \Phi\left(\frac{1}{\lambda}\left(\frac{L_{опасн}}{L_{tempo}} - 1\right)\right) + \\
 + (1 - p_0) \cdot \Phi\left(\frac{1}{\lambda}\left(\frac{L_{опасн}}{L_{прогн}} - 1\right)\right)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

В зависимости от значений $L_{прогн}$, L_{tempo} выбираем уже адаптированные формулы (2) или (4).

Для метеоусловия $H(t)$ (высоты облачности) формулы применяются аналогично.

Литература

1. Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» №128 от 31 июля 2009 г., стр. 95
2. ИКАО. Приложение 3 к конвенции о международной гражданской авиации. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. Дополнение В. Точность прогнозов, желательная с точки зрения эксплуатации. Издание 17, июль 2010 г. Стр. 218
3. Максвелл, Дж.К. Пояснения к динамической теории газов / Дж.К. Максвеллс// Phil. Mag. – 1860. – Vol. 19, pp. 19–32; Vol. 20, pp. 21–37.
4. Баврин, И. И. Краткий курс высшей математики для химико-биологических и медицинских специальностей /И.И. Баврин // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
5. Хастингс, Н., Пикок, Дж. Справочник по статистическим распределениям / Перевод с английского А. К. Звонкина. – М.: Статистика, 1880. – 95 с.