

Моделирование облачных полей с целью обеспечения полетов беспилотных летательных аппаратов

Г. Н. Бакаев, email: bakaev074@gmail.com¹

И. В. Круссер

¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (Воронеж)

***Аннотация.** В данной работе представлена методика прогнозирования высоты нижней границы облаков на основе комплексного использования метеорологической и радиолокационной информации с целью обеспечения полетов беспилотных летательных аппаратов.*

***Ключевые слова:** высота нижней границы облаков, метеорологическая и радиолокационная информация, отражаемость, наблюдения.*

Введение

Несмотря на развитие и оснащение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и аэродромов современными приборами и оборудованием, низкая облачность накладывает существенные ограничения на деятельность БПЛА, а также значительно усложняет действия операторов на самых ответственных этапах полета БПЛА при выполнении специальных задач. Из-за низкой облачности и связанных с ней погодных явлений постоянно происходят авиационные инциденты.

Поэтому при принятии решения об использовании БПЛА особое внимание уделяется прогнозированию ВНГО.

1. Постановка задачи

В настоящее время существует множество способов прогнозирования ВНГО, например, способы А.К. Лугченко, К.Г. Абрамовича, Е.И. Гоголевой, З.А. Спарышкиной и другие. Эти методы основаны на различных эмпирических зависимостях ВНГО от температуры воздуха и температуры точки росы в пункте прогноза. Преимущество данных методы заключается в том, что они позволяют с достаточной степенью точности прогнозировать ВНГО с заблаговременностью до 24 часов. Недостатком этих методов является трудоемкий процесс определения исходных данных и необходимость адаптации их к местным условиям.

Данные обстоятельства заставляют вести поиск новых методов прогноза ВНГО, обладающих достаточной эффективностью и свободных от указанных недостатков.

Современные достижения в области радиофизики и радиоэлектроники позволили осуществлять широкое внедрение дистанционных методов исследования атмосферы с помощью электромагнитных волн в практике гидрометеорологического обеспечения безопасности полетов авиации. Решить задачу пространственно-временного восстановления ВНГО можно, используя информацию, получаемую от метеорологических радиолокационных станций.

В этой связи в работе необходимо было решить следующие задачи:
рассмотреть связь водности облаков с их высотой;

определить связь радиолокационной отражательной способности с водностью облаков;

на основе полученных зависимостей найти связь ВНГО с радиолокационной отражательной способностью;

построить прогностические зависимости и проверить успешность разработанного способа прогноза ВНГО.

2. Разработка методики прогноза ВНГО

В целом, практике исследований, структура облачных зон описывается несколькими интегральными параметрами: водностью, удельной энергией, радиолокационной отражаемостью (радиолокационной отражательной способностью), концентрацией облачных частиц. Все они взаимосвязаны и поэтому, с практической точки зрения, целесообразно выбрать параметр, который достаточно просто и надежно измеряется как в атмосфере, так и вблизи поверхности земли. В качестве этого параметра, удовлетворяющего вышеуказанным требованиям, удобно использовать отражательную способность облаков Z . Радиолокационная отражаемость – это специфическая характеристика метеорологической цели, определяющая ее отражающие свойства. Она является количественной мерой связи мощности отраженных радиолокационных сигналов с микрофизическими свойствами метеоцели. В простейших случаях, когда отражение электромагнитных волн происходит от сферических частиц, размеры которых много меньше длины волны, радиолокационная отражаемость выражается соотношением [1]:

$$Z_r = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \sum_{i=1}^N N(r_i) r_i^6, \quad (1)$$

где r_i – радиус частицы; $N(r_i)$ – концентрация частиц, имеющих размеры r_i ; m – комплексный коэффициент преломления электромагнитных волн веществом частицы; $\left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2$ – множитель, определяющий агрегатное состояние вещества и равный 0,96 для воды и 0,16 для льда.

Так как $N(r_i)$ – непрерывная функция, связанная с дифференциальным законом распределения частиц по размерам $W(r)$ (плотностью вероятности распределения частиц по размерам) следующим соотношением:

$$N(r_i) = N_0 W(r), \quad (2)$$

где N_0 – концентрация частиц, тогда выражение для радиолокационной отражаемости записывается в интегральном виде:

$$Z_r = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 N_0 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^6 W(r) dr, \quad (3)$$

Соотношение (3) выражает Z через плотность вероятности распределения частиц по размерам. На основании (3) можно утверждать, что радиолокационная отражаемость пропорциональна концентрации частиц и шестому начальному моменту их распределения. Аналогичным образом можно получить выражение для водности облаков в интегральной форме:

$$W = \frac{4}{3} \pi \rho N_0 \int_0^{\infty} f(r) r^3 dr, \quad (4)$$

где ρ – плотность гидrometeorных частиц; $f(r)$ – функция распределения частиц по размерам.

Анализируя соотношения (3) и (4), можно прийти к заключению, что по измеренным значениям радиолокационной отражаемости Z можно, зная закон распределения частиц по размерам $f(r)$ и плотность частиц, восстановить значения водности облаков. Вместе с тем, существуют выражения, устанавливающие связь водности облаков с их высотой:

$$\frac{W_0(z)}{S} = \left(1 - \frac{z}{H}\right) - \exp\left(-\frac{H}{B} \frac{z}{H}\right), \quad (5)$$

где $W_0(z)$ – водность облаков; S_k – доля насыщенного пара на уровне нижней границы облаков; H – превышение тропопаузы над нижней границей облака; B – коэффициент, учитывающий температуру на нижней границе облаков T_k и вертикальный градиент температуры γ .

Зависимость отношений $\frac{W_0(z)}{S}$ от $\frac{z}{H}$ при различных $\frac{H}{B}$ представлена на рис. 1.

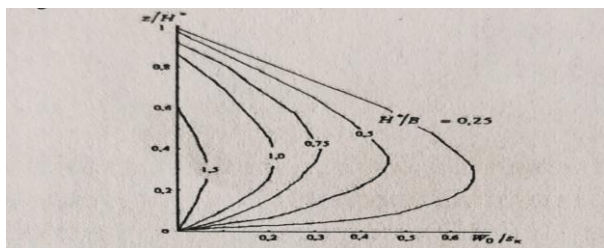


Рис. 1. Распределение удельного содержания воды по высоте

Таким образом, зная $f(r)$, можно установить связь радиолокационной отражательной способностью с водностью облаков и, следовательно, с высотой их нижней границы. Основываясь на физических предпосылках существования такой связи, разработана методика расчета высоты нижней границы облаков с использованием радиолокационной информации и данных метеорологических наблюдений.

При разработке прогностического метода в качестве предварительного перечня предикторов были привлечены температура воздуха, точки росы, относительная влажность и данные радиолокационных наблюдений, в качестве которых использовался $lg z_1$.

Путем расчетов с применением стандартных статистических пакетов был получен ряд прогностических уравнений, позволяющих рассчитать ВНГО. Были определены ошибки каждого уравнения. В результате было выбрано наилучшее уравнение, в качестве предикторов в котором используются значения температуры точки росы и логарифма

отражательной способности:

$$H = 0,8Td + 465,5 \times \lg z_1 - 120,3, \quad (6)$$

где Td – температура точки росы, $\lg z_1$ – десятичный логарифм радиолокационной отражательной способности на высоте 1 км. Для оценки эффективности прогностического уравнения в соответствии с [2] были рассчитаны следующие статистические характеристики:

средняя абсолютная ошибка прогноза $\delta = 0,07 \text{ км}$; средняя относительная ошибка прогноза $\varepsilon = 0,08 \text{ км}$; средняя арифметическая (систематическая) ошибка прогноза $a = 0,06 \text{ км}$; средняя квадратичная ошибка прогноза $\sigma = 0,26 \text{ км}$.

Заключение

Таким образом, полученное уравнение обладает достаточной степенью точности и является простым, что позволяет рекомендовать его в качестве прогностического при определении высоты нижней границы облаков.

Методика применения разработанного прогностического уравнения заключается в следующем.

1. При обнаружении радиолокационными комплексами засветок от облачных систем, определяется направление и скорость их смещения, а также изменение радиолокационной отражательной способности за единицу времени.

2. При удалении засветок, равном 50 км от пункта прогноза, снимаются значения логарифма радиолокационной отражательной способности и температуры точки росы в пункте прогноза.

3. Подставляя найденные значения предикторов в прогностическое уравнение, значение логарифма радиолокационной отражательной способности – с учетом изменения его во времени определяется значение ВНГО.

Список литературы

1. Билетов М.В., Тищенко А.И., Кузнецов И.Е. Радиолокационная метеорология, часть 1. Основы радиолокационной метеорологии. М.: Военное издательство, 2008. С. 75-90.

2. Методические указания. Руководящий документ. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Комитет по гидрометеорологии, 1991, 151 с.