

Методика оценки интенсивности осадков и водности облаков на основе данных дистанционных измерений

И. Е. Кузнецов, email: vaiumet@mail.ru
Д. В. Булгин, email: d.bulgin77@yandex.ru

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

***Аннотация.** В статье рассматривается методика оценки интенсивности осадков и водности облаков на основе данных, полученных от метеорологических радиолокационных станций.*

***Ключевые слова:** Интенсивность осадков, водность облаков, метеорологические радиолокационные данные.*

Введение

Анализ безопасности полетов авиации показывает, что в 30% случаев метеорологические условия явились причиной или сопутствовали авиационным происшествиям. Повышение безопасности полетов зависит от информации, представленной для оценки метеорологической обстановки [1]. В настоящее время основным источником метеорологической информации являются наблюдения за погодой, проводимые на метеорологических станциях и постах. Получаемые данные не позволяют определить метеорологические условия вне зоны наземных наблюдений. Это возможно осуществить путем проведения измерений с использованием метеорологических радиолокационных станций (МРЛС). Получаемая с помощью них информация включает в себя определение зон облачности, осадков, опасных явлений погоды. С помощью МРЛС возможно получить такие метеохарактеристики, как радиолокационная отражаемость, водность метеообъектов и видимость в них.

Вместе с тем, естественная изменчивость атмосферных условий, стохастический характер облачных структур не дают возможность установить строгой математической зависимости между параметрами отраженного от метеоцели радиолокационного сигнала и такими важными метеохарактеристиками, как интенсивность осадков и водность облаков [2].

Поэтому целью работы является повышение качества информации об интенсивности осадков и водности облаков по данным радиолокационных измерений.

1. Модель оценки зависимости интенсивности осадков и водности облаков от радиолокационной отражательной способности

Получить информацию об интенсивности осадков (W) и водности облаков (I) по данным радиолокационного зондирования атмосферы возможно основываясь на зависимости между радиолокационной отражательной способностью наблюдаемых метеорологических целей (Z) и величинами W, I, представленной формулами [2]:

$$Z = 64 N \int_{r \min}^{r \max} r^6 f(r) dr \quad |$$

$$W = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot N \int_{r \min}^{r \max} r^3 f(r) dr \quad (2)$$

$$I = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot N \int_{r \min}^{r \max} r^3 V(r) f(r) dr \quad (3)$$

где N – концентрация капель в единичном объеме; ρ – плотность капель; r – радиус капель, f(r) – закон распределения капель по размерам, V(r) – скорость падения дождевых капель.

При этом, функциональную связь между величинами Z, W и I можно установить только тогда, когда известны законы распределения капель по размерам, а также скорости падения дождевых капель.

В общем виде спектры частиц в облаках и осадках можно описать гамма-распределением вида [3-4]:

$$f(r) = \frac{1}{\Gamma(\alpha + 1)\beta^{\alpha + 1}} r^\alpha \exp\left(-\frac{r}{\beta}\right) \quad (4)$$

где α и β – параметры распределения, связанные соотношением $r_{\text{mod}} = \alpha \beta$, r_{mod} – модальный радиус; $r_{\text{cp}} = \beta (\alpha + 1)$, r_{cp} – средний радиус частиц в облаках или осадках.

Зависимость скорости падения капли от ее размера в широком диапазоне можно аппроксимировать степенной зависимостью:

$$V(r) = C \cdot r^\mu \quad (5)$$

где C и μ – постоянные, определяемые эмпирическим путем.

Зная, что момент p-го порядка для гамма-распределения имеет вид:

$$M_p = \frac{\Gamma(\alpha + p + 1)}{\Gamma(\alpha + 1)} \beta^p \quad (6)$$

на основании формул 1-3 можно получить следующие выражения:

$$Z = 64 \cdot N \cdot M_6 = 64 \cdot N \cdot \frac{\Gamma(\alpha + 7)}{\Gamma(\alpha + 1)} \beta^6 \quad (7)$$

$$W = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot N \cdot M_3 = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot N \cdot \frac{\Gamma(\alpha + 4)}{\Gamma(\alpha + 1)} \beta^3 \quad (8)$$

$$I = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot N \cdot C_2 \cdot M_{3+\mu} = \frac{4}{3} \pi \cdot \rho \cdot N \cdot C_2 \frac{\Gamma(\alpha + 4 + \mu)}{\Gamma(\alpha + 1)} \beta^{3+\mu} \quad (9)$$

Исключая из уравнений 7-9 величину, получим:

$$Z = A_1 \cdot I^{B_1} \quad (10)$$

$$Z = A_2 \cdot W^{B_2} \quad (11)$$

где $A_1 = C_1 \cdot \phi_1(\alpha) \cdot N^{\frac{\mu-3}{\mu+3}}$, $A_2 = \phi_2(\alpha) \cdot N^{-1}$ – коэффициенты, зависящие от микроструктуры облаков, $B_1 = \frac{6}{3+\mu}$ – коэффициент, зависящий от

скорости падения частиц, $\phi_1(\alpha) = \left[\frac{\Gamma(\alpha + 7)}{\Gamma(\alpha + 1)} \right] \cdot \left[\frac{\Gamma(\alpha + 1)}{\Gamma(\alpha + 4 + \mu)} \right]^{B_1}$,

$$\phi_2(\alpha) = K \cdot \left[\frac{\Gamma(\alpha + 7) \cdot \Gamma(\alpha + 1)}{(\Gamma(\alpha + 4))^2} \right], \quad \Gamma(n) = (n-1)!, \quad B_2 = 2, \quad C_1, \quad K -$$

постоянные величины.

Как видно из формул 10 и 11 параметры A_1 и A_2 зависят от микроструктуры облаков и осадков.

Известно, что возрастание интенсивности осадков и водности облаков обычно сопровождается увеличением концентрации и ростом среднего размера капель [3-4]. Поэтому между концентрацией капель, характерными размерами капель облаков и осадков, интенсивностью осадков и водностью облаков существует зависимость.

Если положить, что $N \approx I^{\nu_1}$, $\phi_1(\alpha) \approx I^{\nu_2}$, $\phi_2(\alpha) \approx W^{\nu_3}$, $N \approx W^{\nu_4}$, то уравнения 10 и 11 можно переписать в виде:

$$Z = const \cdot I^{B_1} \quad (12)$$

$$Z = const \cdot W^{B_2} \quad (13)$$

где $B_1 = \frac{6}{3 + \mu} + \nu_2 + \left(\frac{\mu - 3}{\mu + 3} \right) \cdot \nu_1$, $B_2 = 2 + \nu_3 - \nu_4$, ν_1 , ν_2 , ν_3 , ν_4 –

степенные параметры, связывающие интенсивность осадков, водность облаков, концентрацию капель в облаках, скорость их падения и размеры.

Анализ спектров размеров капель облаков и осадков указывает на их большую изменчивость. Кроме того, отсутствие надежных данных о характере изменения микроструктуры облаков и осадков не дает возможности судить о реальных значениях таких параметров, как ν_1 , ν_2 , ν_3 , ν_4 , и тем самым о показателях B_1 и B_2 , поэтому на практике используют эмпирические формулы:

$$Z = A \cdot I^B \quad (14)$$

$$Z = A_0 \cdot W^{B_0}$$

где Z – радиолокационная отражаемость, $\text{мм}^6/\text{м}^3$, W – водность облаков, $\text{г}/\text{м}^3$, I – интенсивность осадков, $\text{мм}/\text{ч}$.

2. Результаты исследования

На основе формул 14 и 15 были получены эмпирические зависимости интенсивности осадков и водности облаков от радиолокационной отражаемости измеренной на первом уровне высоты (1 км), представленные в таблицах 1 и 2.

Зависимость радиолокационной отражательной способности от водности облаков и интенсивности осадков позволяет проводить обнаружение и локализацию (определение местоположения) зон обледенения, а также его интенсивность и видимость в осадках.

При использовании радиолокационных методов измерения интенсивности осадков и водности облаков следует учитывать, что радиолокационная станция определяет среднюю интенсивность осадков и водность облаков в пределах импульсного объема, размеры которого по мере удаления могут быть весьма значительными.

Важнейшее преимущество радиолокационного метода состоит в том, что обеспечивается одновременное дистанционное измерение количества и интенсивности осадков на больших площадях в радиусе 100 – 150 км, а получаемая метеорологическая информация отличаются непрерывностью в пространстве и во времени, высокой оперативностью и всепогодностью.

Недостатком является то, что данный метод является косвенным, так как интенсивность осадков и водность облаков сложным образом

определяются по измеренной величине мощности отраженных сигналов.

Таблица 1

*Эмпирические зависимости интенсивности осадков
от радиолокационной отражаемости*

Слабые (0,25-1 мм/час)	Снег	$I = e^{0,25 \ln \frac{Z}{500}}$
	Дождь	$I = e^{0,636 \ln \frac{Z}{250}}$
	Мокрый снег	$I = e^{0,5 \ln \frac{Z}{1000}}$
Умеренные (1-4 мм/час)	Снег	$I = e^{0,5 \ln \frac{Z}{540}}$
	Дождь	$I = e^{0,588 \ln \frac{Z}{303}}$
	Мокрый снег	$I = e^{0,5 \ln \frac{Z}{1500}}$
Сильные (4-15 мм/час)	Снег	$I = e^{0,5 \ln \frac{Z}{1000}}$
	Дождь	$I = e^{0,671 \ln \frac{Z}{405}}$
	Мокрый снег	$I = e^{0,5 \ln \frac{Z}{2000}}$
Очень сильные (15-100 мм/час)	Снег	$I = e^{0,5561 \ln \frac{Z}{2150}}$
	Дождь	$I = e^{0,623 \ln \frac{Z}{289}}$
	Мокрый снег	$I = e^{0,5 \ln \frac{Z}{2500}}$

Таблица 2

*Эмпирические зависимости водности облаков
от радиолокационной отражаемости*

Кучево- дождевые облака	С градом	$W = e^{0,935 \cdot \ln \frac{Z}{1,4 \cdot 10^6}}$
	С грозой	$W = e^{0,549 \cdot \ln \frac{Z}{2,4 \cdot 10^4}}$
	С ливнем	$W = e^{0,709 \cdot \ln \frac{Z}{31,5}}$
Слоисто-дождевые облака		$W = e^{0,935 \cdot \ln \frac{Z}{1380}}$
Мощно-кучевые, кучевые облака		$W = e^{0,685 \cdot \ln \frac{Z}{16,3}}$
Слоистые облака		$W = e^{0,5 \cdot \ln \frac{Z}{0,048}}$
Фазовое состояние осадков	Дождь	$W = e^{0,549 \cdot \ln \frac{Z}{5,3 \cdot 10^3}}$
	Снег	$W = e^{0,455 \cdot \ln \frac{Z}{3,5 \cdot 10^4}}$

Заключение

Таким образом, представленная в работе методика оценки водности облаков и интенсивности осадков по данным дистанционных измерений позволит повысить качество информации о рассматриваемых метеорологических параметрах в районах со слаборазвитой системой метеорологических наблюдений и может быть использована в автоматизированных системах управления.

Применение данной методики позволит эффективно осуществлять поддержку принятия метеозависимых решений при метеорологическом обеспечении выполнения различных задач как при обеспечении авиации, так и в народном хозяйстве.

Список литературы

1. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. 616 с.
2. Билетов М.В., Тищенко А.И., Кузнецов ИЕ. Радиолокационная метеорология. Часть 1. Основы радиолокационной метеорологии. М.: Воениздат, 2008. 332 с.
3. Скирда И.А., Ульшин И.И., Мартышкин А.Б. Авиационные прогнозы погоды. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. 475 с.
4. Билетов М.В., Кузнецов И.Е. Дистанционные методы получения информации о состоянии атмосферы. Монография. Воронеж: ВВАИУ, 2011. 257 с.