

О. А. Войтович, А. В. Зацеркляная, Г. А. Руднев, Д. Д. Халамейда, Г. И. Хлопов, С. И. Хоменко
Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: khlopov@ire.kharkov.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ НЕКОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ОБЛАКОВ

Флуктуации радиолокационных сигналов, отраженных от облаков, связаны с турбулентными процессами, которые существенно влияют на безопасность полетов авиации. Эти сигналы содержат информацию о физических явлениях, протекающих в облаках. Поэтому дистанционное зондирование облачности с помощью метеорологических радаров представляет значительный интерес для диагностики и прогноза метеорологических явлений, происходящих в облаках. Однако большинство подобных радаров основано на некогерентной обработке отраженных сигналов, спектральные характеристики которых в литературе практически не описаны, поэтому в работе приведены результаты годичного цикла экспериментальных исследований спектров флуктуаций некогерентных сигналов 3-см диапазона радиоволн, отраженных от облаков, а также скорости диссипации турбулентной энергии. Показано, что наиболее вероятное значение ширины спектра флуктуаций скоростей составляет около $\lambda / 2f \approx 45$ см/с при среднеквадратическом значении 27 см/с (λ – рабочая длина волны, f – текущая частота в спектре флуктуаций отраженного сигнала). Обработка результатов измерений также показала, что максимумы радиолокационной отражаемости и скорости диссипации турбулентной энергии в основном не совпадают, причем наибольшее количество турбулентных ячеек разных размеров сосредоточено в верхней части облаков. Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: метеообразования, спектр флуктуаций, турбулентность, скорость диссипации энергии.

Отражения от метеообразований в виде облаков имеют флуктуирующий характер. Интенсивность флуктуаций характеризует степень турбулентности конвективных ячеек, что в значительной мере определяет характер атмосферных процессов, происходящих в облаках [1].

Таким образом, исследования характеристик флуктуаций сигналов, отраженных от облаков, представляет значительный интерес для понимания физики облаков и решения прикладных задач метеорологии [2].

Опубликованные к настоящему времени результаты исследований турбулентности в облаках посвящены в основном результатам измерений с использованием когерентных метеорологических радиолокационных станций (МРЛ) [3]. Однако во многих существующих МРЛ гидрометеорологических служб [4] используется некогерентная обработка сигналов. В этой связи практический интерес представляет использование информации о турбулентности, содержащейся в отраженных от облаков сигналах некогерентных РЛС и полученной с помощью современных вычислительных средств в реальном масштабе времени.

Целью настоящей работы является анализ результатов экспериментального исследования спектральных характеристик некогерентных сигналов, отраженных от облаков в сантиметровом диапазоне длин волн. При этом предполагается, что основной вклад в движение частиц облака вносит турбулентность, кроме того, считается, что исследуемые облака не дают осадков в виде дождя и снега [4]. Для проведения исследований

использовался аппаратно-программный комплекс на основе метеорологической РЛС типа МРЛ-1, модернизированной для проведения подобных измерений.

1. Экспериментальный комплекс для натуральных исследований. Для измерения спектральных характеристик сигналов, отраженных от облаков, использовался аппаратно-программный комплекс [5], в состав которого входит модернизированный радар типа МРЛ-1 с дополнительным оборудованием, предназначенным для управления диаграммой направленности (ДН) антенны, калибровки и расширения динамического диапазона приемного устройства, а также цифровой обработки принятых сигналов и отображения информации.

Радар состоит из приемо-передающего устройства с зеркальной антенной диаметром 3 м, блока управления и индикации, а также синхронно-следящего привода для управления положением ДН антенны по азимуту и углу места.

Особенностью разработанного комплекса является блок калибровки, который обеспечивает формирование импульсного СВЧ-сигнала заданной мощности для измерения чувствительности приемного устройства радара, что позволяет измерять величину радиолокационной отражаемости метеообъектов.

Отраженные сигналы преобразуются в цифровую форму и сохраняются для последующей обработки и отображения на персональном компьютере.

Основные характеристики радара и системы обработки сигналов приведены в табл. 1.

Таблица 1
 Параметры аппаратурно-программного комплекса

№	Параметр	Значение
1	Импульсная мощность, кВт	250
2	Длительность импульса, мкс	1
3	Частота повторения импульсов, Гц	600
4	Предельная чувствительность, дБ/Вт	-132
5	Полоса пропускания приемного устройства, МГц	1,5
6	Динамический диапазон, дБ	45
7	Коэффициент усиления антенны, дБ	46
8	Диаметр антенны, м	3
9	Уровень боковых лепестков, дБ	≤ -21
10	Ширина ДН по уровню -3 дБ, град	0,75
11	Энергетический потенциал, дБ	215
12	Частота дискретизации, МГц	2,5
13	Количество отсчетов в ячейке	4
14	Интерфейс связи с ПК	RS-232

2. Результаты обработки данных радиолокационного зондирования. Сигналы с выхода линейного детектора некогерентной РЛС имеют постоянную составляющую U_0 и флуктуационную компоненту $\Delta U(t)$, которая несет основную информацию о турбулентных процессах в облаках. Процедура обработки сигналов включает в себя вычисление энергетического спектра флуктуационной компоненты в виде [6]

$$S(\omega) = \int_0^T |\Delta U(t)|^2 e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$, f – текущая частота спектра флуктуаций отраженных сигналов, $\Delta U(t) = U(t) - \bar{U}$, причем среднее значение $\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$ асимптотически стремится к постоянной составляющей $\bar{U} \rightarrow U_0$, если время усреднения существенно больше интервала корреляции отраженного сигнала $T \gg \tau_c$ [7].

В рассматриваемом случае исследовались слоисто-кучевые облака, пример радиолокационного изображения которых приведен на рис. 1 в координатах высота–дальность при сканировании антенны РЛС по углу места от 0 до 80°.

Радиолокационное изображение облака отражает его неоднородную структуру, что свидетельствует о сложных процессах турбулентного перемешивания. Внутри облака изменяется, температура, давление, влажность, что может приво-

дить к значительным флуктуациям амплитуд отраженных сигналов.

Поэтому отдельная реализация (рис. 2) и, следовательно, текущий энергетический спектр флуктуаций (рис. 3) отраженных от облаков сигналов отличаются значительной дисперсией [6].

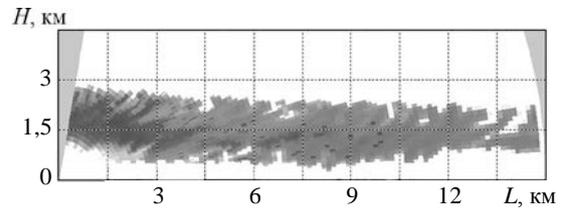


Рис. 1. Радиолокационное изображение слоисто-кучевой облачности

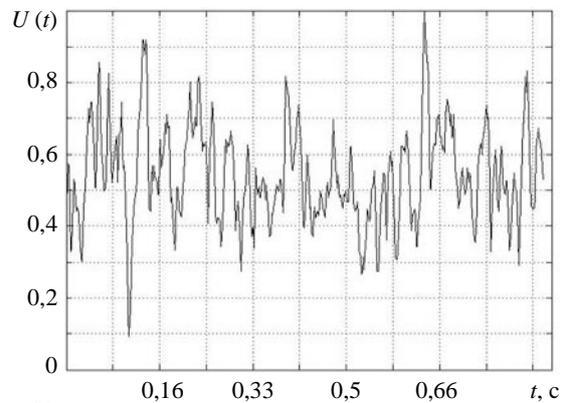


Рис. 2. Пример реализации сигнала, отраженного от облака

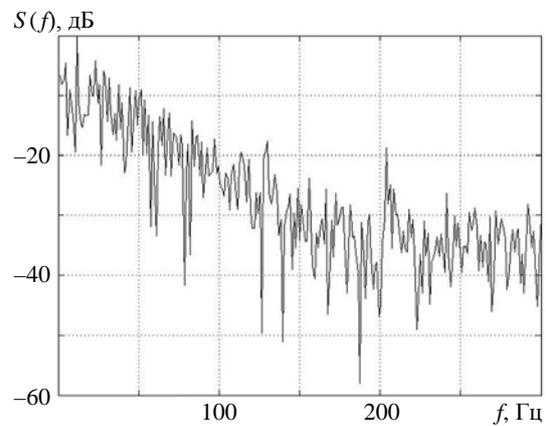


Рис. 3. Спектр флуктуаций сигнала, приведенного на рис. 2

Для получения устойчивых спектральных оценок в работе используется сглаживание данных путем усреднения по ансамблю реализаций. Как показано в работе [6], для сигналов, отраженных от метеообразований, усреднение по 80 и более реализациям обеспечивает достаточно сглаженный спектр (флуктуации спектральных составляющих не более 1,5 дБ). Это подтверждает энергетический спектр флуктуаций сигналов, отраженных от слоисто-кучевого облака (рис. 4).

Спектр получен усреднением по ансамблю 100 реализаций (ось абсцисс представлена в масштабе $\lambda/2f$, где λ – рабочая длина волны). Введение такого масштаба горизонтальной оси, как будет показано ниже, вызвано необходимостью использования формул, связывающих скорость диссипации турбулентной энергии с эффективной шириной спектра некогерентных сигналов.

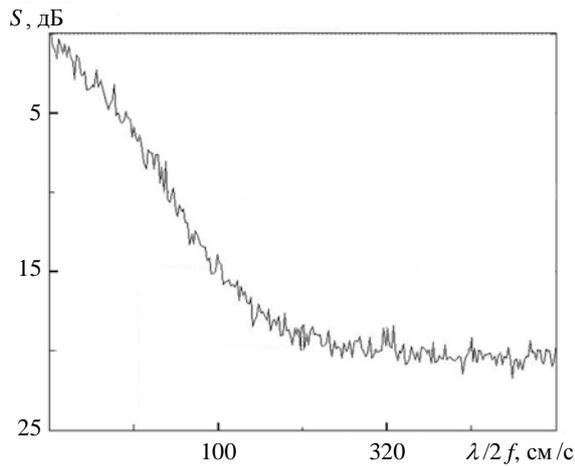


Рис. 4. Пример усредненного энергетического спектра сигналов, отраженных от слоисто-кучевого облака (рис. 1)

При этом одной из информативных характеристик спектра является его эффективная ширина

$$\Delta f_{ef} = \frac{1}{S_m} \int_0^{f_{max}} S(f) df, \quad (2)$$

где S_{max} – максимальное значение ширины спектра; f_{max} – максимальное значение частоты спектра.

Из анализа экспериментальных данных, представленных на рис. 5, следует, что эффективная ширина спектра, как правило, меняется в пределах облака, что также отражает неоднородность его структуры. Это подтверждается результатами измерений зависимости эффективной ширины спектра, умноженной на половину длины волны, от наклонной дальности вдоль луча РЛС на рис. 5, R , дистанция, отсчитываемая от переднего края облака.

Как видно, зависимость вдоль луча РЛС может иметь равномерный характер (рис. 5, а), максимумы по краям облака (рис. 5, б), а также максимум в центре (рис. 5, в), что подчеркивает наличие неоднородных образований внутри облака. На последних двух рисунках измеренные в разрешаемых объемах значения соединены сплошной линией.

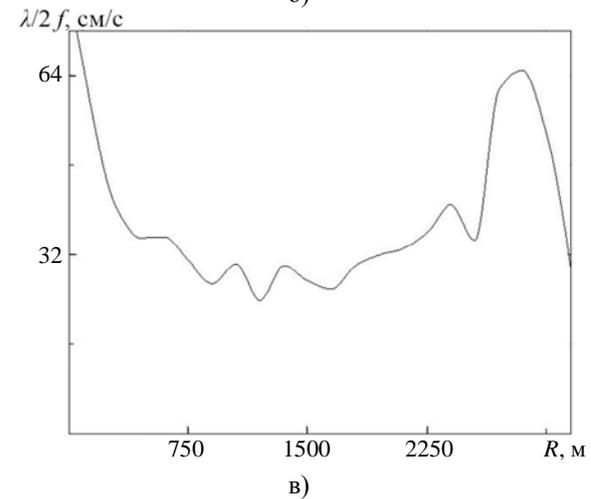
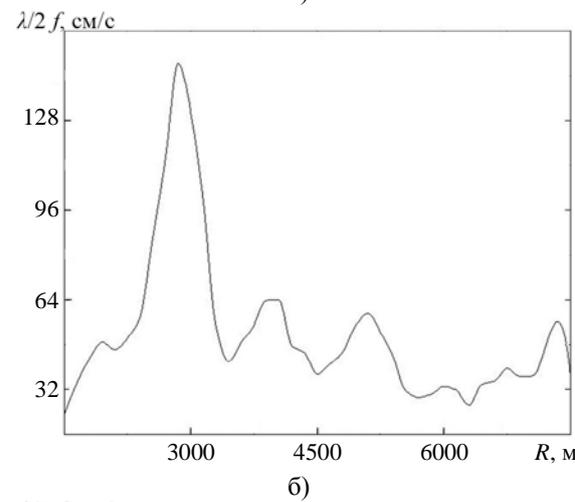
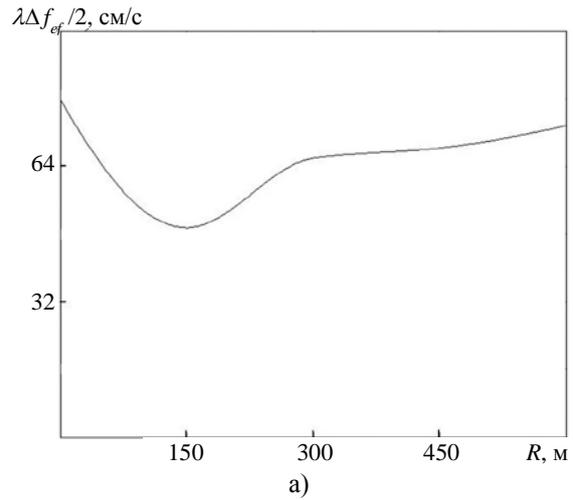


Рис. 5. Типичные зависимости ширины спектра внутри облака вдоль луча МРЛ

Кроме того, распределение ширины спектра внутри облака зависит от типа облачности и метеорологических условий. На рис. 6 приведена гистограмма распределения ширины спектра, рассчитанная по результатам годовых измерений.

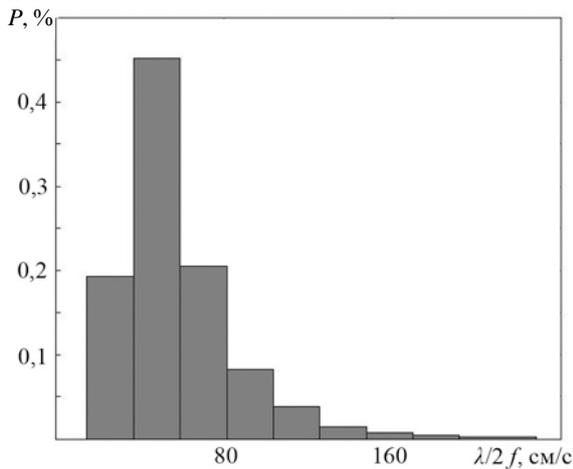


Рис. 6. Гистограмма распределения эффективной ширины спектра сигналов, отраженных от кучево-дождевой облачности

Как показывает вычисление среднего значения и среднеквадратического отклонения распределения ширины спектра, наиболее вероятное значение ширины спектра флуктуаций скоростей соответствует $\lambda/2f \approx 45$ см/с, а среднеквадратичное отклонение равно 27 см/с.

При исследовании атмосферных процессов, в частности, в авиационной метеорологии, большое практическое значение имеет задача обнаружения турбулентностей в тропосфере. Интенсивность турбулентности характеризуется скоростью диссипации турбулентной энергии ε [1, 2], которая, в свою очередь зависит от эффективной шириной спектра отраженных некогерентных сигналов, длины волны и структурной постоянной флуктуаций скорости ветра [9].

Рассмотрим рассеивающий объем в виде цилиндра, диаметр основания которого $D_r = \Delta\theta R$ определяется шириной ДН $\Delta\theta$ и расстоянием R до рассеивающего объема, а высота – размером ячейки разрешения по дальности $\Delta R = c\tau_p/2$ (c – скорость света, τ_p – длительность зондирующего импульса). Это позволяет связать характеристику турбулентности в виде скорости диссипации турбулентной энергии с эффективной шириной спектра некогерентных сигналов

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \frac{1,5}{C_\xi^{3/2} \Delta R} \left[\frac{\lambda}{2} \Delta f_{ef}\right]^3, \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{R\Delta\theta}{\Delta R} \leq 0,5$; C_ξ – структурная постоянная флуктуаций скорости ветра.

Выражение (3), как указывалось выше, справедливо в случае, когда основной вклад в движение частиц облака вносит турбулентность при отсутствии осадков.

На рис. 7 приведены примеры измеренной зависимости нормированного значения радиолокационной отражаемости [10] (пунктирная линия) и скорости диссипации турбулентной энергии (сплошные кривые) от наклонной дальности вдоль луча антенны РЛС.

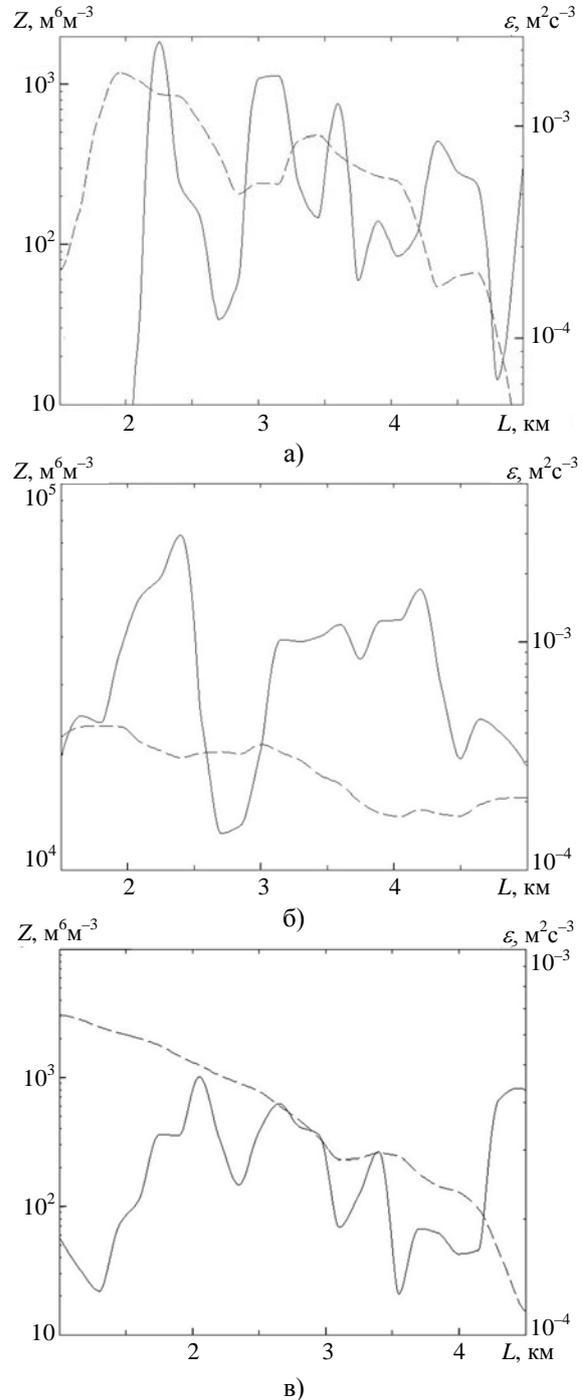


Рис. 7. Зависимость радиолокационной отражаемости (пунктир) и скорости диссипации турбулентной энергии (сплошные кривые) от наклонной дальности вдоль луча РЛС

Измерения проводились для приземной трассы (угол места 10°), в связи с чем полученные

данные характеризуют процессы в нижней части облачности. При этом зависимости рассчитаны для слоистых облаков (рис. 7, а), для высококучевых облаков (рис. 7, б) и для слоисто-кучевых облаков (рис. 7, в). При этом метеорологические условия на поверхности земли для приведенных данных были практически одинаковы: температура $10 \div 12$ °С, давление ≈ 750 мм рт. ст., влажность $80 \div 100$ %.

Как видно, радиолокационная отражаемость облаков ($Z = 10^3 \div 3 \cdot 10^4$ мм⁶м⁻³) так же как и скорость диссипации турбулентной энергии $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-3}$ м²с⁻³, в первую очередь определяются мощностью облака.

Таким образом, приведенные данные косвенно подтверждают связь процессов перемешивания и конвективных движений с мощностью облака. Кроме того, отметим, что области с большей радиолокационной отражаемостью совсем не обязательно соответствуют зонам повышенной турбулентности.

Эта тенденция также сохраняется и для пространственной структуры облака, показанной на рис. 8, на котором приведено радиолокационное изображение слоисто-кучевого облака в системе координат дальность-высота.

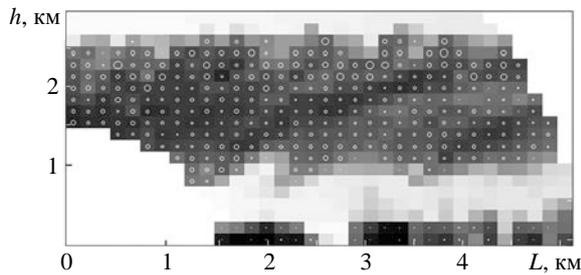


Рис. 8. Распределение радиолокационной отражаемости и скорости диссипации турбулентной энергии в облаке

Здесь величина радиолокационной отражаемости соответствует шкале интенсивности (табл. 2), а скорость диссипации турбулентной энергии (3) – шкале размеров светлых колец (табл. 2).

Таблица 2

Градации отражаемости и турбулентности в облаке

№	Шкала отражаемости, мм ⁶ м ⁻³	Шкала скорости диссипации турбулентной энергии, м ² с ⁻³
1	■ – 10^1	
2	■ – 10^2	• – $3 \cdot 10^{-4}$
3	■ – 10^3	◦ – $6 \cdot 10^{-4}$
4	■ – 10^4	◦ – $9 \cdot 10^{-4}$
5	■ – 10^5	◦ – $12 \cdot 10^{-4}$
6	■ – 10^6	◦ – $15 \cdot 10^{-4}$

Отметим, что приведенная картина показывает, что турбулентность в облаке в основном сосредоточена в верхних слоях, где воздействие солнечной энергии приводит к формированию конвективных ячеек, внутри которых образуются турбулентные движения.

Проведенные измерения и обработка их результатов подтверждают возможность использования характеристик спектра флуктуаций некогерентных сигналов, отраженных от облаков для исследования их структуры.

Выводы. Таким образом, текущий энергетический спектр некогерентных сигналов, отраженных от облачности, отличается значительной дисперсией, поэтому для получения устойчивых спектральных оценок необходимо использовать сглаживание данных путем усреднения по ансамблю реализаций ($N_r = 100$). Эффективная ширина спектра флуктуаций принятых некогерентных сигналов значительно изменяется в пределах облака, что свидетельствует о наличии внутренних конвективных процессов. Анализ повторяемости ширины спектра по результатам годичных измерений показал, что наиболее вероятное значение эффективной ширины спектра скоростей, соответствует ≈ 45 см/с. Одновременные измерения радиолокационной отражаемости и скорости диссипации турбулентной энергии показывают, что области сильной отражаемости и турбулентности часто не совпадают. Зондирование пространственной структуры облака показало, что турбулентность, в основном, сосредоточена в верхних слоях, где воздействие различных факторов, в том числе и солнечной энергии, приводит к формированию конвективных ячеек, которые отличаются наличием турбулентных зон.

Библиографический список

1. Шмелер С. М. Физика конвективных облаков / С. М. Шмелер. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 229 с.
2. Мейсон Б. Дж. Физика облаков / Б. Дж. Мейсон; пер. с англ. под ред. В. Г. Морачевского. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 542 с.
3. Довиак Р. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Р. Довиак, Д. Зрич; пер. с англ. под ред. А. А. Черникова. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 509 с.
4. Radar in Meteorology / Ed. D. Atlas. – Boston: Amer. Meteor. Soc., 1991. – P. 577–606.
5. Аппаратурно-программный комплекс для исследования радиолокационных отражений от метеообразований / Е. Н. Белов, О. А. Войтович, Т. А. Макулина и др. // Радиопизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиопизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2009. – 14, № 1. – С. 57–63.
6. Спектр флуктуаций некогерентных сигналов, отраженных от мелкомасштабных неоднородностей тропосферы / Е. Н. Белов, О. А. Войтович, А. В. Зацекляная и др. // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – 12, № 3. – С. 408–413.
7. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол; пер. с англ. под ред. И. Н. Коваленко. – М.: Мир, 1989. – 50 с.

8. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл.-мл.; пер. с англ. под ред. И. С. Рыжака. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
9. Мельничук Ю. В. Измерение скорости диссипации кинетической энергии турбулентных движений в облаках и осадках / Ю. В. Мельничук, Г. А. Смирнова, А. А. Черников // Тр. Центральной аэрологической обсерватории. – 1973. – Вып. 110. – С. 12–21.
10. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети / Т. А. Базлова, Н. В. Бочарников, Г. Б. Брылев и др. – СПб.: Гидрометеоздат, 2002. – 331 с.

Рукопись поступила 12.05.2015.

O. Voitovych, A. Zatserklyana, G. Rudnev,
D. Khalameida, G. Khlopov, S. Khomenko

INVESTIGATION OF FLUCTUATIONS OF INCOHERENT SIGNALS SCATTERED BY CLOUDS

Fluctuations of signals scattered by clouds deal with turbulent processes, which strongly influence flight safety and contain information about physical phenomena in clouds. That is why remote sensing by weather radar is of great interest for diagnosis and forecast of meteorological phenomena that take place in clouds. But the majority of such radar use incoherent signal processing, spectral characteristics of which practically have not been described in literature, so in the paper we present the results of yearlong experimental study of incoherent signal fluctuations spectrums in 3 cm waveband reflected from clouds in 3 cm waveband as well as dissipation speed of turbulent energy. As it was shown the most probable velocity spectrum width is about $\lambda / 2f \approx 45$ cm/s and mean square value is 27 cm/s, where λ is operating wavelength and f is current frequency in signal spectrum. Also the maximums of radar reflectivity and dissipation speed do not coincide, at that the most number of turbulent cells of

different dimensions are concentrated in upper cloud parts because of maximal influence of solar energy.

Key words: meteorological objects, spectrums of fluctuations, turbulence, rate of energy dissipation.

О. А. Войтович, А. В. Зацеркляна, Г. О. Руднев,
Д. Д. Халамейда, Г. І. Хлопов, С. І. Хоменко

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЛУКТУАЦІЙ НЕКОГЕРЕНТНИХ СИГНАЛІВ, ВІДБИТИХ ВІД ХМАР

Флуктуації радіолокаційних сигналів, відбитих від хмар, пов'язані з турбулентними процесами, які істотно впливають на безпеку польотів авіації. Ці сигнали містять інформацію про фізичні явища, що протікають в хмарах. Тому дистанційне зондування хмарності за допомогою метеорологічних радарів становить значний інтерес для діагностики та прогнозу метеорологічних явищ, що відбуваються в хмарах. Однак більшість подібних радарів заснована на некогерентній обробці відбитих сигналів, спектральні характеристики яких в літературі практично не описані, у зв'язку з чим в роботі наведені результати річного циклу експериментальних досліджень спектрів флуктуацій некогерентних сигналів 3-см діапазону радіохвиль, відбитих від хмар, а також швидкості дисипації турбулентної енергії. Показано, що найбільш імовірне значення ширини спектра флуктуацій швидкостей становить близько $\lambda / 2f \approx 45$ см/с при середньоквадратичному значенні 27 см/с (λ – робоча довжина хвилі, f – поточна частота в спектрі флуктуацій відбитого сигналу). Обробка результатів вимірювань також показала, що максимуми радіолокаційної відбиваності і швидкості дисипації турбулентної енергії, в основному, не збігаються, причому найбільшу кількість турбулентних осередків різних розмірів зосереджено у верхній частині хмар.

Ключові слова: метеоутворення, спектр флуктуацій, турбулентність, швидкість дисипації енергії.