

УДК 551.508.57, PACS 551.508.57:

ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ ГИДРОМЕТЕОРОВ НА РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ДОПЛЕРОВСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РЛС

Д.И. Вельмискин, канд. техн. наук,
А.С. Лимонов, канд. техн. наук,
Т.М. Пустовит, асс.,
Е.А. Дяченко, асс.,
И.В. Бучинская, асс.

*Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, 65016, Одесса, Украина, avto@odeku.edu.ua*

В статье рассматривается влияние различных параметров гидрометеоров на разные параметры отраженных от них радиоволн.

Разработаны модели отражаемости радиоволн с учетом микроструктуры гидрометеоров в различных стадиях их существования для формирования прогноза изменений метеорообстановки. Также полученные результаты доказывают тот факт, что использование поляризационно-доплеровских МРЛС существенно повышают достоверность оценки степени опасности метеорообразований.

Ключевые слова: анализ чувствительности, параметры гидрометеоров, характеристики радиоволн.

1. ВВЕДЕНИЕ

В [1-4] рассмотрены модели структур различных гидрометеоров и модели отражаемости от них радиоволн.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ чувствительности изменения параметров отраженных радиоволн к изменению характеристик гидрометеоров осуществлен путем моделирования основных соотношений полученных в [1-4].

Цель статьи: определить чувствительность характеристик поляризационно-доплеровской метеорологической РЛС (МРЛС) к степени влияния изменений параметров гидрометеоров.

Изложение основного материала. Выбор математической модели структуры облаков

Чтобы исследовать влияние микроструктуры на радиолокационные показания использовалось понятие чувствительность S_{α}^{β} . Она записывается как:

$$S_{\alpha}^{\beta} = \frac{\partial \alpha(\beta)}{\partial \beta} \frac{\beta}{\alpha(\beta)}, \quad (1)$$

где α обозначает рассматриваемое наблюдение и β параметр выпадающей частицы [5,6].

Коэффициент чувствительности определяет эффект изменения $\Delta \beta$ в β на α :

$$\frac{\alpha(\beta + \Delta \beta)}{\alpha(\beta)} = \left(\frac{S_{\alpha}^{\beta} \Delta \beta + \beta}{\beta} \right). \quad (2)$$

Моделирование произведено путем использования следующих соотношений [5,6]:

– для дифференциальной отражающей способности использовано соотношение

$$Z_{dr} = \frac{q_{hh}}{q_{vv}} = \frac{((\Lambda_3 - \Lambda_1) \sin^2 \delta \sin^2 \alpha + \Lambda_1)^2}{((\Lambda_3 - \Lambda_1) \sin^2 \delta \cos^2 \alpha + \Lambda_1)^2}, \quad (3)$$

– для линейного отношения деполаризации

$$L_{dr} = \frac{q_{hv}}{q_{hh}} = \frac{\left(\frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin^2 \delta (\Lambda_3 - \Lambda_1)^2\right)}{((\Lambda_3 - \Lambda_1) \sin^2 \delta \cos^2 \alpha + \Lambda_1)^2}. \quad (4)$$

Результаты моделирования приведены на рис. 1.

Для горизонтальной отражающей способности использовано соотношение [7-9]

$$Z_h = N_0 \int \sigma_{hh}(D_e, \delta) D_e^{\mu_e} \frac{3.67 + \mu_e}{D_0} p_{\delta}(\delta) dD_e d\delta, \quad (5)$$

а дисперсия отклонений доплеровских частот

$$W_d^2 = \frac{1}{Z_d} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} (v - V_d)^2 S_V(v) dv. \quad (6)$$

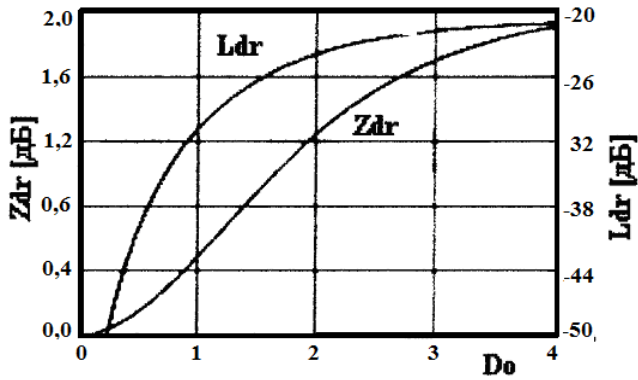


Рис. 1 – Z_{dr}, L_{dr} , как функции D_0 ; $\mu=0, \sigma_\delta=20^0$.

Результаты моделирования представлены на рис. 2.

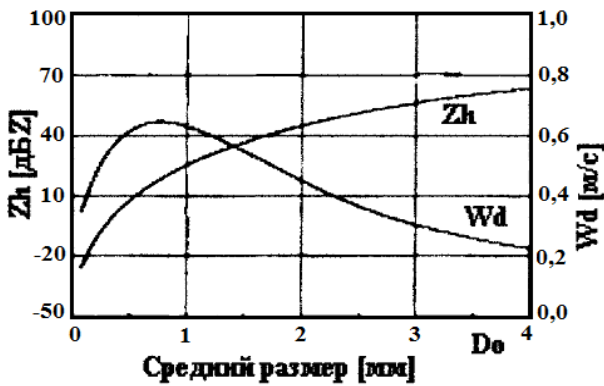


Рис. 2 – Z_h, W_d как функции D_0 ; $\mu=0, \sigma_\delta=20^0$.

Результаты моделирования зависимости Z_{dr}, L_{dr}, Z_h, W_d от значения коэффициента дисперсии μ представлены на рис. 3 и рис. 4, а на рис. 5 от значения эффективной поверхности рассеивания σ_δ .

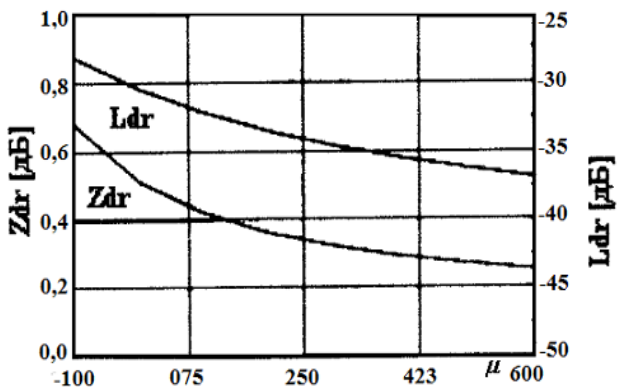


Рис. 3 – Z_{dr}, L_{dr} , как функции μ ; $D_0=1$ м; $\sigma_\delta=20^0$.

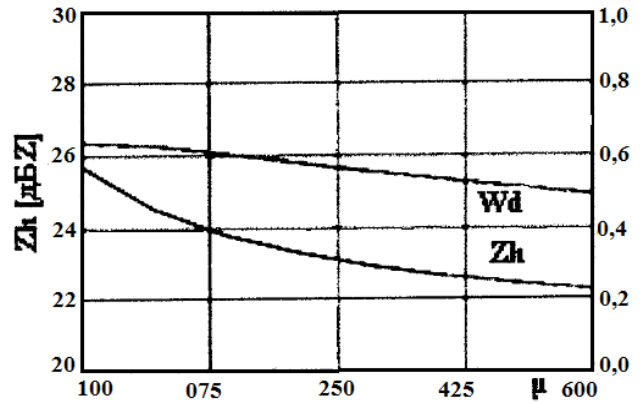


Рис. 4 – Z_h, W_d как функции μ ; $D_0=1$ мм; $\sigma_\delta=20^0$.

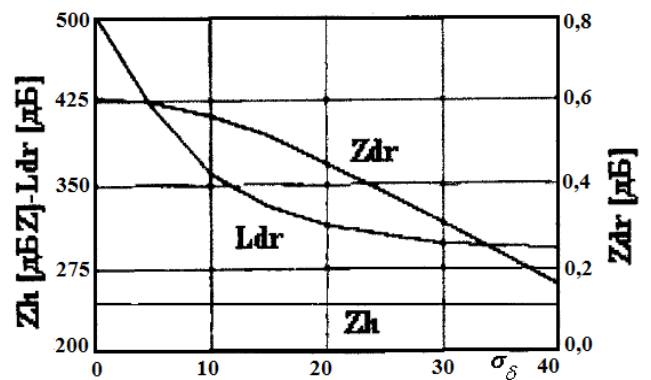


Рис. 5 – Z_h, Z_{dr} и L_{dr} , как функция от σ_δ ; $D_0=1$ мм; $\mu=0$.

Результаты моделирования вышеуказанных параметров сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Обобщает результаты Z_h, Z_{dr}, L_{dr} и $W_{d,m}$ от изменений $D_0, \mu, \sigma_\delta, N_0$ и W_d

	N_0	D_0	μ	σ_δ	W_d
Z_h	+	+	-	0	0
Z_{dr}	0	+	-	-	-
L_{dr}	0	+	-	+	+
$W_{d,m}$	0	+/-	-	0	+

Из табл. 1 видно, что для определения N_0 следует использовать Z_h , а для определения D_0 и μ могут использовать все характеристики отраженного сигнала, поэтому следует выбирать наиболее чувствительные параметры, а это Z_{dr} для D_0 (рис. 6) и L_{dr} для μ (рис. 7) и т.д. Отсю-

да будут вытекать соответствующие алгоритмы обработки отраженных сигналов, т.е. для определения μ с максимальной точностью следует найти отражаемость на основной поляризации, затем определить кроссполяризационную составляющую и найти отношение L_{dr} .

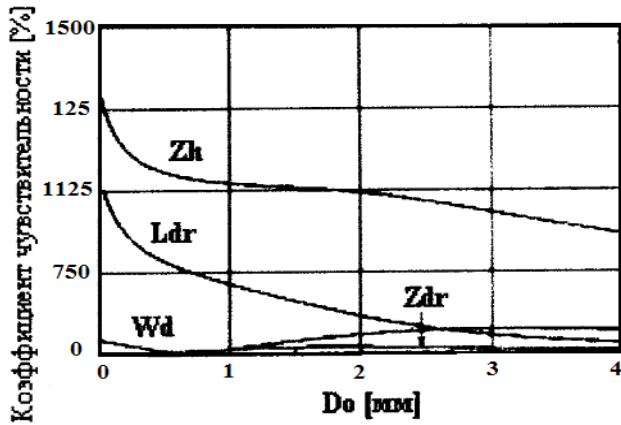


Рис. 6 – Коэффициенты чувствительности Z_h , Z_{dr} , L_{dr} и W_d как функция D_0 ; $\mu=0$ и $\sigma_\delta = 20^\circ$.

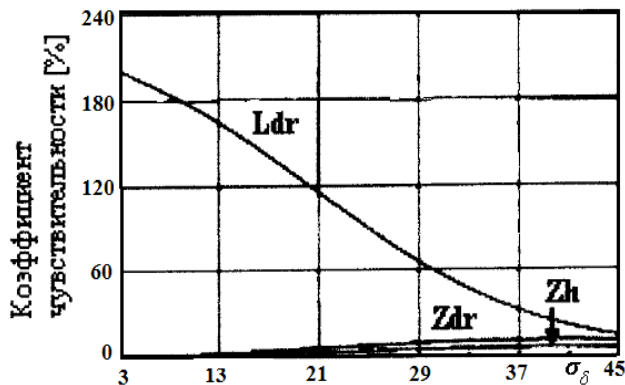


Рис. 7 – Коэффициенты чувствительности Z_h , Z_{dr} , и L_{dr} как функция изменений σ_δ ; $\mu=0$ и $D_0=1$ мм.

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных измерений, приведенных в [3], показало их удовлетворительное согласие.

Далее рассматриваются статистические характеристики поляризационно-доплеровских параметров метеорологических РЛС.

Преобразование радиолокационных отражений в дожде зависит от распределения относительного размера падающих частиц. Гамма распределение размеров падающих частиц содержит три неизвестных параметра, в то время как число параметров, которые могут быть получены, зависит от количества наблюдений. Когда

измерена только отражающая способность, получен только один параметр, но комбинируя его с дифференциальной отражающей способностью, можно получить второй параметр и, проведя доплеровские измерения, получим третий параметр.

Когда используются МРЛС с одним параметром, чтобы получить интенсивность дождя R , применяют закон мощности, который связывает отражающую способность Z с R :

$$Z = \alpha R^\beta, \quad (7)$$

в которой α и β – константы, которые зависят от распределения размеров выпадающей частицы. Зависимость поляризации отраженных радиоволн от формы частицы не используется в этом случае.

Z и R чувствительны к распределению размеров выпадающей частицы, и поэтому отношения $Z-R$ зависят от типа дождя. Известны три зависимости для разных Z от R от типов дождя:

$$\begin{cases} Z = 200R^{1.6}, & \text{для слоёобразного дождя;} \\ Z = 31R^{1.7}, & \text{для орографического дождя; } c \text{ в } \text{мм}^6\text{м}^{-3} \text{ и } R \text{ в } \text{ммч}^{-1}; \\ Z = 486R^{1.37}, & \text{для гроз.} \end{cases}$$

Приведенные соотношения учитывают обратное рассеяние Рэля каплями дождя. Уравнение Рэля предполагает постоянными N_0 и μ ; D_0 – меняющийся параметр. Однако N_0 может изменяться на несколько децибел. Поэтому рассмотрим альтернативный метод для получения трех параметров распределения размеров падающих частиц.

Комбинация Z_{dr} и W_d используется, чтобы получить μ . D_0 получаем из Z_{dr} и на последнем шаге используется Z_h , чтобы получить N_0 .

При этом, получение необходимой точности требует интегрирования сигналов рис. 8 дает результат интегрирования более чем 1500 м и 64 с.

Чтобы проиллюстрировать статистическое распределение параметров распределения размеров падающих частиц, гистограммы N_0 , D_0 и μ даны на рис. 9.

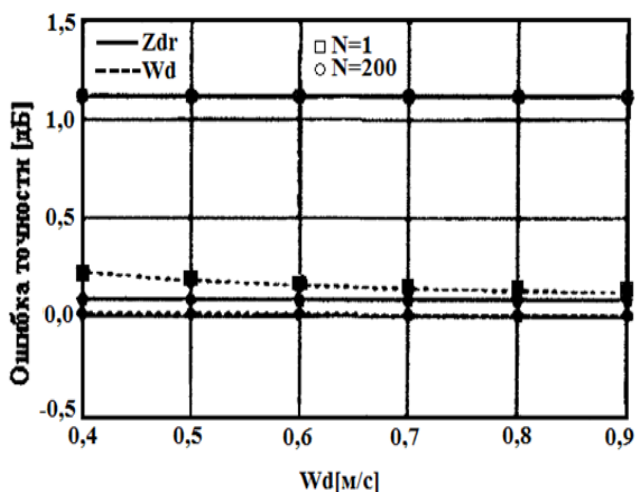


Рис. 8 – Точность измерений Z_{dr} и W_d . N количество примеров для 3,2 секундных примеров W_d и Z_{dr} .

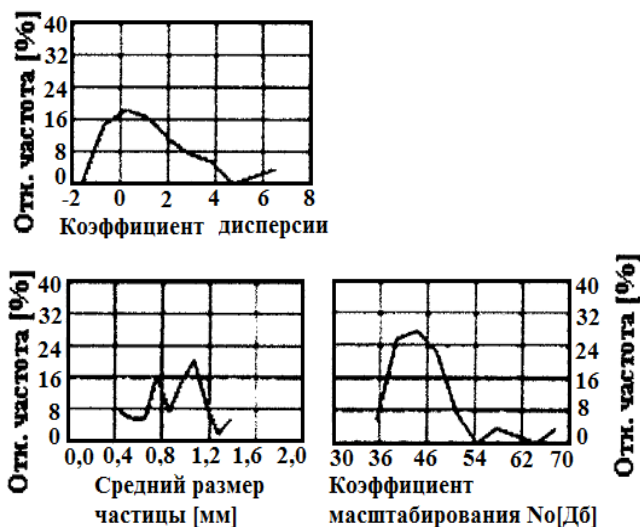


Рис. 9 – Гистограммы μ , D_0 и N_0 , при соответствии данным рис. 8.

Таблица 2 дает среднее и среднеквадратическое отклонение μ , D_0 и N_0 . Та же приведены среднее и среднеквадратическое отклонение N_0 и D_0 в случае, если $\mu = 0$.

Таблица 2 – Среднеквадратическое отклонение значений

	μ	D_0	N_0	μ	D_0	N_0
		[мм]	[дБ]		[мм]	[дБ]
Среднее	0,6	0,9	45,6	0	1,2	36,4
Среднеквадратическое	2,3	0,3	9,0	0	0,2	5,2

Диаграмма рассеяния D_0 и μ дана на рис. 10. Для $\mu < 3$, если D_0 увеличивается, тогда увеличивается μ . Экспериментально показано, что, хотя использовались различные распределения размеров падающих частиц, фактор формы, разложенной на множители μ , увеличились для интенсивностей дождя, меньших, чем 4 мм/ч, и уменьшился для больших интенсивностей дождя.

Приведенные на рис. 10 данные представляют собой полином третьей степени, который связывает μ с D_0 :

$$D_0 = 0,97 + 0,14\mu^3 - 0,043\mu^2 + 0,0033\mu \pm 0,1 \text{ мм} \quad (9)$$

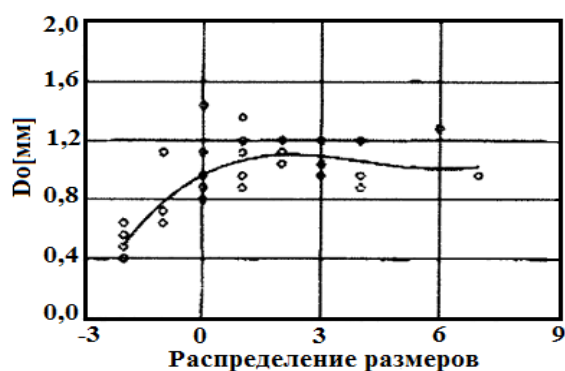


Рис. 10 – Точечная диаграмма D_0 и μ .

Рис. 11 показывает временную зависимость интенсивности дождя. Полученная МРЛС интенсивность дождя вычислена двумя способами: 1) только Z_{dr} , используя $\mu = 0$, и 2) W_d и Z_{dr} , используя, также изменения μ .

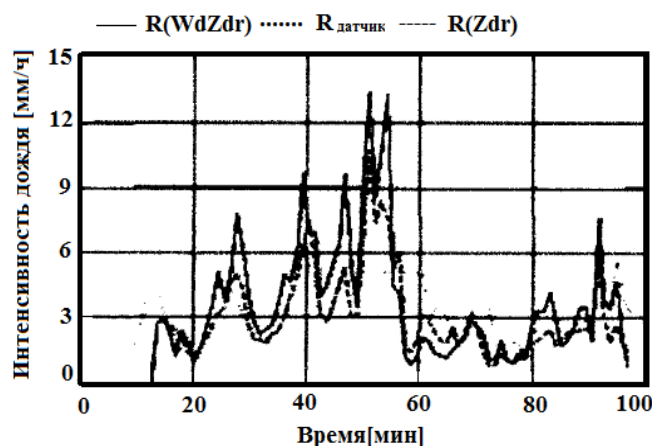


Рис. 11 – Временная зависимость полученных от МРЛС интенсивностей дождя $R_{W_d Z_{dr}}$ и $R_{Z_{dr}}$.

Также показаны данные датчика дождя. Время интеграции составляет 64 с.

Выше описывались методы использования поляризационно-доплеровских параметров для проведения тонкого анализа гидрометеоров с целью выполнения требований ИКАО по метеорологическому обеспечению полетов. Ниже на рис. 12, рис. 13 показаны примеры описания предложенных методов в виде алгоритмов выполнения определенных действий для получения тех или иных характеристик гидрометеоров с целью оценки их состояния или с целью прогнозирования перехода гидрометеоров в то или иное следующее состояние.

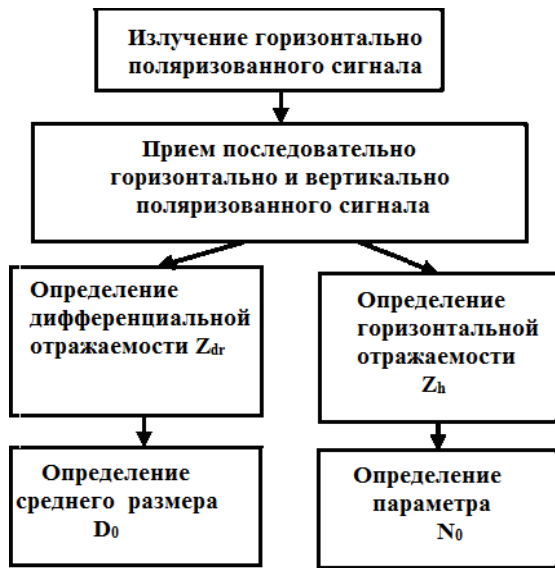


Рис. 12 – Излучение горизонтального поляризационного сигнала с использованием разных параметров

Очень важной характеристикой при выполнении полетов является наличие турбулентности в слоях воздуха. Наличие турбулентности резко влияет на угол наклона метеочастиц. Степень турбулентности можно определить, исследуя корреляционные связи между L_{dr} и W_d , а также одновременно между W_d и Z_{dr} . Это показано в виде алгоритма на рис. 14.

В заключение приведен еще один пример, связанный с анализом процесса таяния, который может быть использован для прогнозирования изменения метеоусловий на трассе полета ВС, либо в зоне аэропорта. Суть заключается в том, что, если наблюдается дождь, то отсутствует корреляция между Z_{dr} и W_d . Если возникает процесс таяния, т.е. переход

к дождю, то Z_{dr} и W_d положительно коррелированы.



Рис. 13 – Излучение горизонтального поляризационного сигнала путем сравнения результатов

Соответствующий алгоритм последовательности операций аналогичен, приведенному на рис. 14, с заменой блока «определения наличия турбулентности», на блок определения «наличия перехода к дождю».

3. ВЫВОДЫ

1. Для определения коэффициента масштабирования распределения размеров падающих частиц N_0 необходимо использовать горизонтальную отражающую способность Z_h .

2. Для определения среднего значения размера частицы осадков D_0 и коэффициента дисперсии μ можно использовать все характеристики отраженного сигнала. Однако следует выбирать наиболее чувствительные, а именно: дифференциальную отражающую способность Z_{dr} для D_0 и линейное отношение деполаризации L_{dr} для μ . Отсюда вытекает соответствующий алгоритм обработки отраженного сигнала.

3. Разработаны модели отражаемости радиоволн с учетом микроструктуры гидрометеоров в разных стадиях их существования для формирования прогноза изменения метеообстановки.

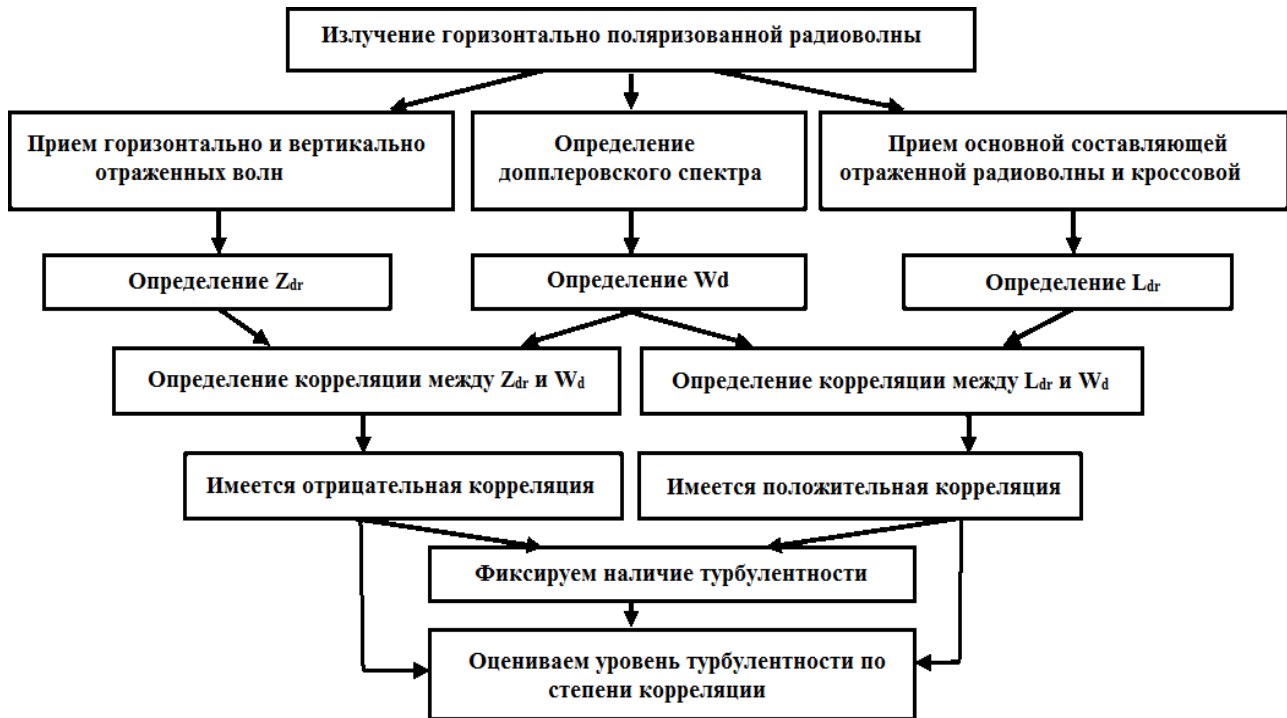


Рис. 14 – Определение степени турбулентности

4. Полученные результаты доказывают тот факт, что использование поляризационно-доплеровских МРЛС существенно повышают достоверность оценки степени опасности метеобразований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лимонов А. С., Вельмискин Д. И., Пустовит Т. М., Дяченко Е. О., Бучинская И. В. Анализ математических моделей структуры осадков и отражаемости радиоволн от них // Вестник ОДЕКУ. 2016. №20. С. 142-149.
2. Горелик А. Г., Мельничук Ю. В. О связи спектра флуктуаций радиолокационного сигнала с движением рассеивателей в метеобъектах // ДАН СССР. 1961. Т. 140. С. 579-582.
3. Сокол П. П., Логвин А. И. Возможности повышения уровня метеорологического обеспечения полетов на основе совершенствования алгоритмов функционирования МРЛС // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 152. С. 204-205.
4. Горелик А. Г., Стерлядкин В. В. Доплеровская томография в радиолокационной метеорологии // Изв. АН СССР. 1990. №1. С. 47-54.
5. Сокол П. П. Повышение точности определения интенсивности дождя метеорадиолокатором // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. №152. С. 63-67.
6. Сокол П. П. Модели отражаемости радиолокационных сигналов от различных форм единичных гидрометеоров // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 152. С. 68-71.
7. Terminal Doppler weather radar (TDWR). A briefing paper. Federal Aviation Administration. USA, Boulder, 1988, p. 18.
8. Пампел Х. Обнаружение и сверхкраткосрочное прогнозирование конвективных явления, опасных для

авиации // в сб.: Новые тенденции в гидрометеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1998. Вып. 4. С. 70-83.

9. Безлова Т. А. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2002. 332 с.

REFERENCES

1. Limonov A. S., Velmiskin D.I., Pustovit T. M., Dyachenko E. O., Buchinskaya I.V. *Visn. Odes. derž. ekol. univ.- Bull. OSENU*, 2016, no. 20, pp. 142-149. (In Russian)
2. Gorelik A. G., Mel'nichuk Yu. V. *DAN SSSR – Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1961, vol. 140, pp. 579-582. (In Russian)
3. Sokol P. P., Logvin A. I. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2010, no. 152, pp. 204-205. (In Russian)
4. Gorelik A. G., Sterlyadkin V. V. *Yzv. AN SSSR - Academy of Sciences of the USSR*, 1990, no. 1, pp. 47-54. (In Russian)
5. Sokol P. P. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2010, no. 152, pp. 63-67. (In Russian)
6. Sokol P. P. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, 2010, no. 152, pp. 68-71.
7. *Terminal Doppler weather radar (TDWR). A briefing paper. Federal Aviation Administration. USA, Boulder, 1988, p. 18.* (In Russian)
8. Pampel H. Discovery and supershort-term prognostication конвективных phenomena, dangerous for an aviation. *Novye tendentsii v gidrometeorologii* [New trends in hydrometeorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1998, no. 4, pp. 70-83. (In Russian)
9. Bezlova T. A. *Meteorologicheskie avtomatizirovannye radiolokatsionnye seti* [Meteorological automated radiolocation networks]. Sankt-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002. pp. 332.

INFLUENCE OF MACROSTRUCTURE OF THE HYDROMETEORS ON A RADAR MEASUREMENT OF POLARIZATION-DOPPLER WEATHER RADARS

D. I. Velmiskin, cand. tech. sci.,

A. S. Limonov, cand. tech. sci.,

T. M. Pustovit, ass.,

E.A. Diachenco, ass.

I. V. Buchinskaya, ass.

*Odessa State Environmental University,
15, Lvivska St., 65016 Odessa, Ukraine, avto@odeku.edu.ua*

Possibility of determining models of structures of different hydrometeors and models of their reflectivity with regard to radio-waves was presented. To determine the scaling factor of size distribution of incident particles it is necessary to use horizontal reflective capability, all reflected features of signal can be used to define an average particle size of precipitation and dispersion coefficient. However, the most susceptible characteristics, namely, differential reflective capability and linear depolarization ratio should be chosen. Hence one has an appropriate algorithm processing of a reflected signal. Models of radio-waves reflectivity considering hydrometeors' microstructure at different stages of their existence were developed to ensure a forecast of meteorological situation changes. The results demonstrate that the use of polarization Doppler meteorological radar stations significantly improve accuracy of assessment of danger caused by meteorological formations.

Keywords: sensitivity analysis, parameters of hydrometeor, characteristics of radio-waves.

ВПЛИВ МАКРОСТРУКТУРИ ГІДРОМЕТЕОРІВ НА РАДІОЛОКАЦІЙНІ ВИМІРЮВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ДОПЛЕРІВСЬКИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ РЛС

О.С. Лімонов к.т.н., **Д.І. Вельміскін** к.т.н.,

Т.М. Пустовіт, асс., **К.О. Дяченко** асс.,

І.В. Бучинська асс.,

Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, 65016 Одеса, Україна, avto@odeku.edu.ua

У статті розглядається вплив різних параметрів гідрометеорів на різні параметри відбитих від них радіохвиль. Розроблені моделі відбиваності радіохвиль з урахуванням мікроструктури гідрометеорів в різних стадіях їх існування для формування прогнозу змін метеообстановки. Також отримані результати доводять той факт, що використання поляризаційно-доплеровських МРЛС істотно підвищують достовірність оцінки ступеня небезпеки метеоутворень.

Ключові слова: аналіз чутливості, параметри гідрометеорів, характеристики радіохвиль.

Дата первого представления: 29. 10. 2015

Дата поступления окончательной версии: 18. 11. 2016

Дата опубликования статьи: 24. 11. 2016