

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Пітерцев Олександр Андрійович

УДК 681.518.2:004.942:621.3.095.1:551.57

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗОН
ПОТЕНЦІЙНОГО ОБЛЕДЕНЕННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН**

05.13.06 – «Інформаційні технології»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Пітерцев О.А.

Науковий керівник:
Яновський Фелікс Йосипович,
лауреат Державної премії України,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри електроніки
Національного авиаційного університету

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Пітерцев О.А. Інформаційна технологія виявлення зон потенційного обледеніння повітряних суден. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. – Національний авіаційний університет.

Дисертацію присвячено розробленню інформаційної технології підвищення безпеки польотів ПС на базі методів визначення зон потенційного небезпечного обледеніння повітряних суден. Основою поданих в роботі результатів є вперше розроблений метод оцінювання поляриметричних інформативних параметрів зон небезпечного обледеніння, вдосконалений метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи шляхом додавання послідовності операцій для виявлення нового класу об'єктів – зон небезпечного обледеніння, і метод багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння, у якому використовуються поляризаційні характеристики електромагнітних хвиль, відбитих від метеорологічних об'єктів та параметри повітряного судна і маршруту польоту.

Перший з поданих методів дозволяє провести оцінку основних параметрів сигналів бортової інформаційної метеорологічної системи, що були відбиті від метеорологічних об'єктів (досліджуваної області простору, заповненої гідрометеорами різних типів) на основі представлений в роботі математичної моделі відбиття електромагнітних хвиль від гідрометеорів несферичної форми. Модель дозволяє проводити розрахунки поліметричних параметрів відбитого сигналу за допомогою апроксимації несферичної форми розсіювачів (гідрометеорів) сфероїдами обертання та використання модифікованих формул Релея.

Другий з представлених методів описує алгоритм виявлення зон потенційного обледеніння шляхом ідентифікації типів гідрометеорів на основі аналізу відмінності поляриметричних інформативних параметрів відбитого сигналу бортової інформаційної метеорологічної системи з урахуванням результатів математичного

моделювання та оцінювання цих параметрів у першому з поданих у роботі методів. Теоретичні дослідження, наведені в роботі, підтвердженні експериментальними даними, зокрема результатами практичних вимірювань хмар та опадів існуючими метеорологічними радіолокаторами.

Третій з методів, що розроблений в дисертації, використовує математичний апарат нечіткої логіки для оцінювання ступеня небезпеки обледеніння повітряних суден. Проаналізовано існуючі методи визначення зон обледеніння, і запропоновано нові, більш досконалі методи, що дозволяють попереджувати про небезпеку обледеніння до його початку з урахуванням сукупності таких факторів, як поляриметричні параметри відбитого сигналу, температура, висота, швидкість польоту, тривалість перебування у небезпечній зоні та ін. Оцінено достовірність цих методів, і наведено рекомендації до їх реалізації в існуючих інформаційних системах забезпечення безпеки польотів.

Ключові слова: інформаційні технології, безпека польотів, небезпечні метеорологічні явища, обледеніння, метеорологічна радіолокація, поляриметричний підхід.

ABSTRACT

Pitertsev A.A. Information technology identifying potential aircraft icing zones. - Qualification scientific thesis on the rights of the manuscript.

Thesis for the Master degree of Candidate of Technical Sciences. (Ph.D.) in specialty 05.13.06 - information technology. - National Aviation University.

The basis of the results presented in the work are the first time developed method for estimating of informative polarimetric parameters of potential icing zones, an improved method of detection and classification of hazardous meteorological objects with the help of onboard information meteorological systems, in which algorithmic consistency of implementations was added to identify potentially hazardous areas of possible icing and the method of multi-criterion estimation of the risk of icing of airplanes.

The determination of zones containing drops of super-cooled liquid that pose a threat of icing in the area of space in the flight direction of an aircraft is proposed to done by analysis of the polarization features of the structure of reflected radar signals.

The first of the presented methods allows us to estimate the main parameters of the signals of the onboard information meteorological system, received by onboard radar from meteorological objects (the area under study, filled with hydrometeors of different types), and based on the mathematical model of reflection of electromagnetic waves from hydrometers of a non-spherical form presented in the paper. The model allows calculating the polarimetric parameters of the reflected signal by approximating the non-spherical shape of the scatterers (hydrometers) by spheroid rotations and using the modified Rayleigh formulas.

The second of the presented methods describes the algorithm for detecting potential icing zones by identifying the types of hydrometeors based on the analysis of the difference between polarimetric informative parameters of the reflected signal of the onboard information meteorological system, taking into account the results of mathematical modeling and estimation of these parameters in the first of the presented methods in this thesis. The theoretical studies presented in the work are confirmed by experimental data, in particular, the results of practical measurements of clouds and precipitation by existing meteorological radar.

The third method, described in this thesis, uses a mathematical apparatus of fuzzy logic to assess of icing degree of an aircraft. Also, in this work, existing methods of icing zones detection were analyzed, and new and more advanced methods were proposed to warn of the threat of icing before it began, taking into account the combination of factors such as the polarimetric parameters of the reflected signal, temperature, height, velocity, duration of stay in a danger zone, and others. The estimation of the reliability of these methods is given, and the recommendations for their implementation in the existing information systems of ensuring the safety of flights are given also.

Keywords: information technologies, flight safety, dangerous meteorological phenomena, icing, meteorological radar, polarimetric approach.

Список публікацій здобувача

Публікації в наукових фахових виданнях України

1. The Analytical Method of Polarimetric Variables Prediction in The Case of Remote Sensing of Ice Crystals Clouds / Pitertsev A.A. // Journal “Electronics and Control Systems”. K.: НАУ. – 2017. – №51. C. 24-29.
2. On the Problems of Radar Detection of Zones of Possible Aircraft Icing-In-Flight / Pitertsev A.A. // Journal “Electronics and Control Systems”. K.: НАУ. – 2014. – №40. C. 98-102.
3. Microwave scattering from particles in turbulent atmosphere and its application for hydrometeor type recognition and turbulence detection / Yanovsky F.J., Marchuk V.V., Ostrovsky Ya.P., Pitertsev A.A., Khraisat Ya.S.H., Ligthart L.P. // Вісник Інженерної академії України. – 2007. – № 3-4. – С. 16-23.
4. Обнаружение зон потенциального обледенения самолетов при радиолокационном зондировании метеорологических объектов / Питерцев А.А. // X.: ИПЕ НАН журнал «Радиофизика и электроника». – 2006. – Том 11, № 1. – С. 74-77.

Наукові публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометрических баз

5. Pitertsev A.A. Refined Models and Numerical Simulation of Polarimetric Radar Signals Scattered by Various Types of Hydrometeors / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // Proceedings of 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop (RMSW-2016). – K.: 2016. – C. 48-49 (Scopus).
6. Pitertsev A.A. Efficiency estimation for the parametric radar algorithm of detection of probable aircraft icing zones / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // MMET-2014. – Д.: 26-28 серпня 2014. – С. 243-246 (Scopus).
7. Pitertsev A.A. Polarimetric Radar as a Device for Detecting Potentially Dangerous Zones of Aircraft Icing / Pitertsev A.A., Yanovsky F. J // Proceeding IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2014). – K.: 2014. – С. 38-41 (Scopus).
8. Pitertsev A.A. Polarimetric Method for Remote Predicting a Zone of Icing-in-Flight in Clouds and Precipitation / Pitertsev A.A., Yanovsky F. J // Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, – K.: 25-27 серпня 2011. – С. 220-223 (Scopus).

9. Pitertsev A. Radar Determination of Probable Icing-in-Flight / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proceedings Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2008). – K.: 2008. – C. 293-295 (Scopus).
10. Pitertsev A. Identification of the meteorological objects on doppler-polarimetric radar data by using fuzzy logic based algorithm / Pitertsev A., Yanovsky F. // MMET-2006. – X.: 26-29 червня 2006. – C. 344-346 (Scopus).
11. Pitertsev A. Advanced Algorithm for Radar Detection of Icing. Calculation of Polarimetric Observables / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proceedings International Workshop on Microwaves, Radar and Remote Sensing MRRS 2005. – K.: 19-21 вересня 2005. – C. 87-90 (Scopus).
12. Pitertsev A. Mathematical Modeling and Simulation of Backscattering from Hydrometeors of Different Types. / Pitertsev A., Yanovsky F. // Conference Proceedings. 10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – Д.: 14-17 вересня 2004. – C. 292-294 (Scopus).

Публікації у наукових виданнях іноземних держав за напрямом, з якого підготовлено дисертацію

13. Pitertsev A.A. Copula Based Dependence Measure for Polarimetric Weather Radar / Pitertsev A.A., Sinitsyn R.B., Yanovsky F.J. // International Radar Symposium (IRS-2015). – Дрезден, Німеччина: 2015. – C. 597-603 (Scopus).
14. Pitertsev A.A. Detection of Potential Aircraft Icing Zones by Remote Sensing of Meteorological Objects / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // “Telecommunications and Radio Engineering”. – Volume 65, Issue 7. – 2006. – C. 633-640 (журнал США, Scopus).
15. Pitertsev A.A. Advanced Algorithm for Radar Detection of Icing. Calculation of Polarimetric Observables / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // “Telecommunications and Radio Engineering”. – Volume 66, 2007, Issue 12. – 2007. – C. 1465-1471 (журнал США, Scopus).
16. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // Proceedings of the 37th European Microwave Conference, 978-2-87487-001-9. – EuMA, Мюнхен, Німеччина: 2007. – C. 1550-1553 (Scopus).

17. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proceedings of the 4th European Radar Conference, 978-2-87487-004-0. – EuMA, Мюнхен, Німеччина: 2007. – С. 271-274 (Scopus).
18. Yanovsky F.J. Inverse Scattering and Radar Cross Section of Heterogeneous Hydrometeor Ensemble / Yanovsky F.J., Marchuk V.V., Ostrovsky Y.P., Pitertsev A.A., Ligthart L.P. // Proceedings 2nd European Conference on Antennas and Propagation. CD ROM: ISBN 9780863418426. – Единбург, Великобританія: 2007. – С. 1-5 (Scopus).
19. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A., Yanovsky F. // Book of Abstracts Proceedings of the 37th European Microwave Conference, EuMC-2007. – Мюнхен, Німеччина: 2007. – С. 58.
20. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A., Yanovsky F. // Book of Abstracts 4th European Radar Conference, EuRAD-2007. – Мюнхен, Німеччина: 2007. – С. 12.
21. Pitertsev A. Simulation of Microwave Backscattering on Hydrometeors / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proc. Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. – Vol.2. – Краків, Польща: 2006. – С. 499-502 (Scopus).
22. Pitertsev A.A. Identification of the Dangerous Meteorological Objects on Doppler-Polarimetric Radar Data Using the Neural Network Based Algorithm / Pitertsev A.A., Marchuk V.V., Yanovsky F.J. // Proc. IEEE Int. Radar Symposium, – Краків, Польща: 2006. – С. 225-228 (Scopus).
23. Yanovsky F.J. Neural Network Identification Algorithm for Weather Radar / Yanovsky F.J., Pitertsev A.A., Ostrovsky Y.P., Mazura I.V., Marchuk V.V. // Extended Abstracts Int. Symposium on Tropospheric Profiling ISTP7. – Боулдер, штат Колорадо, США: 11-17 червня 2006. – Paper 6.2, С. 3.
24. Yanovsky F.J. Neural Network Identification Algorithm for Weather Radar / Yanovsky F.J., Pitertsev A.A., Ostrovsky Y.P., Mazura I.V., Marchuk V.V. // Proc. Int. Symposium on Tropospheric Profiling ISTP7. – Боулдер, штат Колорадо, США: 11-17 червня 2006. – CD ROM, С. 9.

25. Lawama A. Microwave Propagation through the Mixed Ensemble of Hydrometeors: Effect of Back Scattering / Lawama A., Pitertsev A., Yanovsky F. // Book of Abstracts European Microwave Week, EuMC 2005. – Париж, Франція: 4-6 жовтня 2005. – С. 155.
26. Lawama A. Microwave Propagation Trough Mixed Ensemble of Hydrometeors: Effect of Backscattering / Lawama A., Pitertsev A., Yanovsky F. // Proc. European Microwave Week 2005 Conference, EuMA, IEEE. – Париж, Франція: 2005. – С. 1351-1354 (Scopus).
27. Yanovsky F. Aircraft Icing Prevention Radar System: Models and Software for Calculation of Information Parameters. / Yanovsky F. Pitertsev A., Sidorenko T. // Proc. of International Radar Symposium IRS-2005. – Берлін, Німеччина: 2005. – С. 489-492 (Scopus).

Патенти

28. Пітерцев О.А., Яновський Ф.Й. Патент України на корисну модель № 98228 «Спосіб визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» від 27.04.2015.
29. Пітерцев О.А., Яновський Ф.Й. Патент України на корисну модель № 100763 «Пристрій для визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» від 10.08.2015.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	13
ВСТУП.....	15
1. ОБЛЕДЕНІННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ЯК НЕБЕЗПЕЧНЕ	
МЕТЕОРОЛОГІЧНЕ ЯВИЩЕ	25
1.1. Загальні відомості	25
1.2. Умови виникнення зон небезпечного обледеніння	26
1.3. Актуальність проблеми раннього виявлення зон небезпечного обледеніння.....	28
1.4. Постановка завдання ранньої діагностики зон небезпечного обледеніння з борта повітряного судна	31
Висновки до першого розділу.....	39
Список використаних джерел у першому розділі	40
Список публікацій здобувача за матеріалами першого розділу	47
2. МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ	
ПАРАМЕТРІВ ЗОН НЕБЕЗПЕЧНОГО ОБЛЕДЕНІННЯ	49
2.1. Математичні моделі зв'язку поляризаційних параметрів із характеристиками гідрометеорів.....	49
2.1.1. <i>Початкові дані.....</i>	49
2.1.2. <i>Радіолокаційна відбиваність.....</i>	50
2.1.3. <i>Матриця зворотного розсіювання</i>	52
2.1.4. <i>Поляриметричні вимірювані параметри</i>	57
2.2. Поляриметричний підхід до розрахунку параметрів радіолокаційного сигналу, що відбувається від еліпсоїда	58
2.2.1. <i>Основні параметри і визначення</i>	58
2.2.2. <i>Варіант з вертикальною орієнтацією головної осі еліпсоїда (без нахилу)</i>	61
2.2.3. <i>Похила орієнтація головної осі еліпсоїда (загальний випадок)</i>	69

2.3. Поляриметричний підхід до розрахунку параметрів радіолокаційного сигналу, відбитого від хмари еліпсоїдів	73
2.3.1. <i>Статистичні параметри і розподіли в хмари</i>	73
2.3.2. <i>Рівномовірна орієнтація кристалів в об'ємі хмари</i>	75
2.3.3. <i>Переважно впорядкована орієнтація кристалів у хмарі</i>	80
2.4. Поляризаційні характеристики рідких крапель (хмарних і дощових)	84
2.5. Поляризаційні характеристики кристалів льоду	92
2.6. Поляризаційні характеристики шару танення	100
2.7. Структурно-аналітична схема методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів зон небезпечного обледеніння	102
Висновки до другого розділу	104
Список використаних джерел у другому розділі.....	105
Список публікацій здобувача за матеріалами другого розділу.....	107
3. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ ЗА ДОПОМОГОЮ БОРТОВОЇ МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	109
3.1. Характеристика умов отримання експериментальних даних	109
3.1.1. <i>Загальні відомості про джерела експериментальних даних</i>	109
3.1.2. <i>Коротка характеристика апаратури</i>	110
3.2. Методика експериментів і завдання оброблення даних	117
3.3. Експериментальна перевірка адекватності моделей	118
3.4. Аналіз результатів вимірювання РВ, ДВ і ЛДВ одноканальним радіолокаційним поляриметром	119
3.5. Аналіз результатів вимірювання РВ, ДВ і ЛДВ двоканальним поляриметричним радіолокатором ТARA.....	122
3.6. Аналіз результатів вимірювання РВ, ДВ і ЛДВ системою PARSAХ	126
3.7. Аналіз існуючих алгоритмів виявлення зон небезпечного обледеніння	129
3.8. Логічні процедури виявлення зон небезпечного обледеніння	130

3.9. Вимоги до порогових рівнів основних параметрів.....	135
Висновки до третього розділу	137
Список використаних джерел у третьому розділі	138
Список публікацій здобувача за матеріалами другого розділу.....	140
4. МЕТОД БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ СТУПЕНЯ ЗАГРОЗИ ОБЛЕДЕНИННЯ ПОВІТРЯНОГО СУДНА	141
4.1. Оцінювання достовірності виявлення зон небезпечного обледеніння	141
4.2. Оцінювання температури дослідженого метеорологічного об'єкта	145
4.3. Алгоритм виявлення зон небезпечного обледеніння та класифікатор рівня загрози з використанням математичного апарату нечіткої логіки	147
4.4. Структурно-логічна схема інформаційної технології підвищення ефективності функціонування інформаційних систем безпеки польотів літальних апаратів.....	157
Висновки до четвертого розділу.....	159
Список використаних джерел у четвертому розділі	160
Список публікацій здобувача за матеріалами четвертого розділу	161
ВИСНОВКИ.....	163
ДОДАТКИ.....	165
1. Додаток 1. Теоретичні відомості про обледеніння як небезпечне метеорологічне явище	165
1.1. <i>Вплив обледеніння на аеродинамічні якості літака і безпеку польотів</i>	165
1.2. <i>Типи льоду і форма відкладень.</i>	166
1.3. <i>Вплив параметрів ПС та навколошнього середовища на можливість обледеніння.</i>	170
1.4. <i>Боротьба з обледенінням. Протиобліднюючі системи</i>	179
1.5. <i>Приклади авіаційних подій, пов'язаних з обледенінням</i>	182

2.	Додаток 2. Аналіз комбінацій гідрометеорів, що становлять підвищеноу небезпеку обледеніння ПС.....	184
2.1.	<i>Класифікація.....</i>	184
2.2.	<i>Сценарій переохолодженого дощу</i>	185
2.3.	<i>Сценарій шаруватого обледеніння.....</i>	187
2.4.	<i>Сценарій конвективного обледеніння</i>	189
2.5.	<i>Сценарій загального обледеніння</i>	190
3.	Додаток 3. Оцінка температури метеорологічного об'єкту за допомогою температурного градієнту повітря.....	191
4.	Додаток 4. Відомості щодо впровадження результатів дисертаційної роботи в НДЧ ХНУРЕ і НАУ.....	195
5.	Додаток 5. Тексти програм в середовищі розрахунків MATLAB	198
5.1.	<i>Розрахунок значень поляриметричних змінних в MATLAB: кристали льоду стовпчастого типу, розподілені в просторі хаотично</i>	198
5.2.	<i>Розрахунок значень поляриметричних змінних в MATLAB: рідкі краплі води, розподілені в просторі переважно горизонтально</i>	207

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат

БАОС – блок аналогового оброблення сигналів

ДН – діаграма направленості

ДВ – диференціальна відбиваність

ЕМВ – електромагнітне випромінювання

ЕПР – ефективна площа розсіювання

ЗНО – зона небезпечного обледеніння

ІДВ – індикатор дальність–висота

ІКО – індикатор кругового огляду

ІП – інформативні параметри

КК – коефіцієнт кореляції

ЛДВ – лінійне деполяризаційне відношення

МК – модуль керування

МРЛ – метеорологічний радіолокатор

МНРЛС – метеорологічна навігаційна радіолокаційна станція

НМЯ – небезпечне метеорологічне явище

ПР – поляриметричний радіолокатор

ПрС – пристрій сполучення

ПС – повітряне судно

РВ – радіолокаційна відбиваність

РЛС – радіолокаційна станція

ЦАО – центральна аерологічна обсерваторія

ШПП – швидкодійний перемикач поляризацій

ЩРЙ – щільність розподілу ймовірності

ADWICE – German Advanced Diagnosis and Warning system for aircraft ICing Environments

ASRS – Aviation Safety Reporting System

CNS/ATM – Communications, Navigation, Surveillance/ Air Traffic Management

DARR – Delft Atmospheric Research Radar

IRCTR – International Research Centre for Telecommunications and Radar

FAA – Federal Aviation Administration

FFT – Fast Fourier Transform

FPGA – Field-Programmable Gate Array

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NTSB – National Transportation Safety Board

PARSAX – Polarimetric Agile Radar in S– And X–band

PCM – Pulse Code Modulation

SFDR – Spurious-Free Dynamic Range

SLWD – Supercooled Liquid Water Drops

TARA – Transportable Atmospheric RAdar

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

WUT – Warsaw University of Technology

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний стан розвитку інформаційних систем характеризується постійним зростанням вимог до якості та своєчасності інформаційного забезпечення наявних процесів, тим більше це актуально у сфері цивільної авіації, де наслідком прийняття хибних рішень можуть бути людські життя або значні матеріальні втрати. Завдяки інтенсивному розвитку нових технологій у наш час відбуваються кількісні та якісні зміни в інформаційному забезпеченні пілотів та бортових систем ПС у процесах, що супроводжують організацію польотів. Системи забезпечення метеорологічною інформацією на ПС виконують функції передавання, оброблення, зберігання та висвітлення інформації, а отже, належать до класу інформаційних систем.

Постійне вдосконалення методів дистанційного спостереження за метеорологічними явищами зумовило істотне підвищення якості метеорологічної інформації та безпеки польотів у складних метеорологічних умовах. Із самого початку дослідження опадів і хмар за допомогою наземних та бортових метеорологічних інформаційних систем існує складна проблема отримання непрямої інформації (якісної і кількісної) про характеристики об'єктів за результатами оброблення відбитих сигналів. У середині ХХ ст. застосування радіолокаційних засобів отримання метеорологічної інформації справило потужний вплив на інформаційні системи, що використовуються у галузі метеорологічного забезпечення польотів цивільної авіації, завдяки працям таких учених як D. Atlas, L. Battan, E. Kessler, R. Lermitté, J. Marshall, R. Rogers, А.Г. Горелик, В.В. Костарев, Ю.В. Мельничук, В.М. Мучник, Є.М. Сальман, В.Д. Степаненко, А. А. Черніков та ін. У наш час значний внесок у розвиток і вдосконалення метеорологічних засобів отримання інформації зробили V. Bringi, V. Chandrasekar, R. Doviak, A. Illigworth, L. Lighthart, H. Russchenberg, D. Zrnic, Д.М. Ваврів, А.В. Рижков, Г.І. Хлопов, А.Б. Шупляцький, Ф.Й. Яновський, та ін., а внесок у розвиток інформаційних систем Б.Я. Корнієнко, О.Є. Литвиненко, О.Г. Оксюк, П.М. Павленко, В.С. Харченко, О.К. Юдін. Упровадження багатопараметричних поляриметричних методів у бортові та наземні метеорологічні інформаційні системи стримується недостатнім розвитком

і дослідженням відповідних методів оброблення сигналів та інтерпретації даних дистанційного зондування. Значне збільшення кількості параметрів істотно ускладнює оброблення і інтерпретацію інформації, призводячи до багатокритеріальних процедур оброблення і прийняття рішень, які дуже складно оптимізувати і реалізувати.

Створення і розвиток методів для висвітлення інформації про кількісні властивості метеорологічних об'єктів за допомогою наземного та бортового обладнання ПС особливо важливо, оскільки останнім часом істотно зросли вимоги до якості метеорологічної інформації для забезпечення авіації в умовах реалізації нової системи аeronавігаційного забезпечення CNS / ATM (Communications, Navigation, Surveillance/ Air Traffic Management) і концепції Free Flight. Крім того, з'явилася нова потужна елементна база, що в свою чергу сприяло активізації розробок більш складних методів оброблення інформації дистанційних зондувань. Це все створює реальні передумови для впровадження нових методів оброблення сигналів та забезпечення необхідного рівня ймовірності виявлення небезпечних метеорологічних явищ (НМЯ).

Одним з найбільш небезпечних явищ є обледеніння – НМЯ, до якого можуть бути схильні майже будь-які типи літаків і вертолітів, які використовуються в цивільній авіації, а також безпілотні літальні апарати. Фізична природа цього явища полягає в утворенні льодяного нальоту, найчастіше на крилах або корпусі ПС, при kontaktі холодного матеріалу обшивки з атмосферною водою. Визначення зон імовірного обледеніння ПС має важливе практичне значення для підвищення безпеки польотів, а також зниження витрат. Наведемо статистику: з 1978 по 2005 рік Національною Радою з безпеки на транспорті (NTSB) і Федеральним авіаційним управлінням (FAA) США зафіксовано 645 авіаційних подій з причини обледеніння [1]. Система звітності NASA з безпеки польотів (ASRS) містить записи про 30 пригодах за період 2006–2010 рр., спричинених наявністю умов обледеніння ПС у польоті [1]. За іншими даними до 1998 р. зареєстровано 800 випадків льотних пригод у загальносвітовому масштабі [2]. Більш того, якщо великі магістральні авіалайнери мають у своєму арсеналі достатньо засобів боротьби з обледенінням, малі і середні

ПС істотно їм поступаються в цьому сенсі [3]. А для безпілотних літальних апаратів (БПЛА, або UAV – Unmanned Aerial Vehicle) навряд чи можливе розміщення протиоблідновальних систем взагалі через невеликі габарити і вантажопідйомність.

Тема дисертаційної роботи є важливою, оскільки присвячена підвищенню безпеки польотів ПС за допомогою методів визначення зон потенційного обледеніння ПС, що ґрунтуються на інформації дистанційного зондування простору по курсу польоту ПС. Вона відкриває також нові можливості для метеорологічних інформаційних систем різного призначення, включаючи потреби інших галузей, окрім безпеки польотів, зокрема метеорології, гідрології, кліматології, сільського господарства, а також радіотехнічних систем, пов'язаних з поширенням радіохвиль у тропосфері. Основою запропонованих методів є поляриметричний підхід, що має в основі вимірювання й оброблення таких інформативних параметрів, як диференціальна відбиваність, лінійне деполяризаційне відношення, коефіцієнт кореляції при нульовому зсуві та інші, які дозволяють отримувати інформацію про форму і типи гідрометеорів у складі хмар і опадів. Розроблення методів підвищенню безпеки польотів і математичних моделей дистанційного зондування атмосфери, зокрема дослідження нових параметрів, які можуть поліпшити якість інформації про метеорологічні об'єкти і явища, безумовно, є актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота продовжує серію досліджень, присвячених підвищенню безпеки польотів ПС за допомогою оброблення даних бортових інформаційних метеорологічних комплексів для виявлення таких небезпечних для авіації об'єктів, як град [4], зони небезпечної турбулентності [5, 6], зсув вітру [7], та інші [8, 9]. Тема роботи також пов'язана з фундаментальною держбюджетною НДР № 685-ДБ-10 «Теоретико-експериментальне обґрунтування шляхів розширення функціональних можливостей метеорологічного радіолокатора і підвищення ефективності виявлення небезпечних метеорологічних явищ за рахунок використання поляризаційних властивостей зондуючих і відбитих сигналів» (номер держреєстрації 0104U000674) 2010–2013 рр. Автор – один з виконавців і авторів звітів цієї роботи, а також був співавтором розділу «Аналіз методів обробки сигналів і даних в поляриметричних метеорологічних

радіолокаторах» звіту про НДР № 63 / 08.01.01 «Обробка сигналів, зображень та даних в радіоелектронних системах», яка виконувалася кафедрою електроніки НАУ в 2010–2015 pp. Крім того, тема дисертації відповідає науковим програмам Європейського Союзу, зокрема тематиці багаторічної співпраці між НАУ та TU-Delft (Нідерланди), а також проекту EWENT за програмою Erasmus Mundus, згідно з яким у 2012 р. були виконані експерименти з дистанційного зонування опадів у WUT (Політехніка Варшавська, Польща).

Цілі і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності функціонування інформаційних систем безпеки польотів повітряних суден на основі вдосконалення інформаційної технології виявлення зон потенційного обледеніння під час польоту.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких завдань:

1. Виконати аналіз умов виникнення зон небезпечного обледеніння повітряних суден.
2. Розробити математичну модель перетворення та оброблення сигналів бортової метеорологічної інформаційної системи та розробити метод оцінювання поляриметричних інформативних параметрів зон небезпечного обледеніння.
3. Удосконалити метод класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової інформаційної системи шляхом додавання процедури ідентифікації нового класу об'єктів – зон небезпечного обледеніння.
4. Розробити метод багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння для підвищення точності прийняття управлінських рішень щодо наявності небезпечних метеорологічних явищ.
5. Удосконалити інформаційної технологію виявлення зон потенційного обледеніння повітряних суден під час польоту.
6. Розробити програмно-апаратний комплекс та методику оцінювання ефективності методів визначення зон небезпечного обледеніння і виробити рекомендації щодо їх практичного застосування.

Об'єкт дослідження – процес аналізу та оброблення сигналів в інформаційних системах та комплексах.

Предмет дослідження – поляриметричний аналіз та оброблення інформаційних сигналів, отриманих під час сканування простору, та виявлення зон можливого обледеніння повітряних суден.

Методи дослідження. Для виконання теоретичних досліджень використовується математичний аналіз, теорія ймовірностей, математична статистика, теорії сигналів, радіолокації і поляризації електромагнітних хвиль. Для побудови комп'ютерних моделей використовувалися методи математичного моделювання з реалізацією програмного забезпечення в середовищах Mathcad, MatLab і Simulink. Результати теоретичних досліджень і моделювання підтвердженні результатами натурних експериментів з використанням експериментальних даних доплерівсько-поляриметричних радіолокаторів і обробленням даних у середовищі MatLab [26].

Наукова новизна отриманих результатів:

- уперше розроблено математичну модель, яка на відміну від існуючих дозволяє обчислювати параметри електромагнітних хвиль, відбитих від кристалів льоду, крапель переохолодженої рідини та шару танення у хмарах, що надало можливість врахувати поляриметричні характеристики основних типів розсіювачів та їх особливості у небезпечних для польоту метеорологічних умовах [13, 14, 25, 29, 33, 35];
- розроблено метод оцінювання поляриметричних інформативних параметрів зон небезпечного обледеніння, у якому на відміну від існуючих методів ураховуються результати математичного моделювання відбиття сигналів у різних випадках, що дозволяє підвищити якість оброблення поляриметричних даних [12, 22, 23, 24, 37];
- удосконалено метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи шляхом додавання процедури ідентифікації нового класу об'єктів – зон небезпечного обледеніння, що дозволяє розширити перелік небезпечних метеорологічних явищ, інформацію про існування та розвиток яких може бути отримано в оперативному режимі [16, 18, 19, 20, 26, 27];
- уперше розроблено метод багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння, у якому використовуються поляризаційні характеристики

електромагнітних хвиль, відбитих від метеорологічних об'єктів, а також параметри повітряного судна і маршруту польоту, що дало змогу інтегрувати отримання інформації про очікувані метеорологічні умови польоту і підвищити якість управлінських рішень [14, 17, 21, 34];

– уdosконалено інформаційну технологію підвищення ефективності функціонування інформаційних систем безпеки польотів повітряних суден на основі розроблених методів та моделей, що надало можливість виявлення зон потенційного обледеніння повітряних суден під час польоту та підвищення якості оброблення інформаційних сигналів щодо метеорологічної обстановки [15, 28, 30, 31, 32, 36].

Практичне значення отриманих результатів:

– уdosконалено числові методи розрахунку поляриметричних параметрів електромагнітних хвиль, відбитих від крижаних кристалів і крапель переохолодженої води в X-діапазоні частот (9345...9375 МГц, $\lambda = 3,2$ см). Показано варіанти впорядкованої просторової орієнтації гідрометеорів з математичним сподіванням 0...90° та їх хаотичної орієнтації, прораховано варіанти різної форми кристалів льоду, розподілу гідрометеорів за розмірами від 0,01 до 10 мм, розглянуто типи сухих і обводнених частинок і ін. Установлено, що для кристалів льоду у складі хмари теоретичні обмеження граничних значень для лінійного деполяризаційного відношення лежать у діапазоні -14...-24 дБ, для диференціальної відбиваності – у діапазоні -4...4 дБ, для коефіцієнта кореляції – у межах 0,8...1, що дозволило підвищити якість оброблення метеорологічної інформації;

– метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи доповнено новим класом небезпечних явищ – зоною потенційного обледеніння. Так, у загальномісцевому масштабі зареєстровано понад 800 випадків авіаційних пригод через обледеніння літаків у польоті тільки для повітряних суден цивільної авіації, значну частину з яких можна було б передати завчасною інформацією про існування загрози обледеніння;

– запропоновано програмно-апаратний комплекс для реалізації методу багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння. Так, було показано,

що найбільш небезпечний п'ятий ступень загрози обледеніння може спостерігатись за таких середніх значень інформаційних параметрів, як радіолокаційна відбиваність понад 60 дБ, диференціальна відбиваність у межах 0,5...3,5 дБ, лінійне диференціальне відношення менше за -34 дБ, значення коефіцієнта кореляції більше від 0,95, висота польоту в межах 3...6 км, швидкість менша за 700 км/год, температура повітря у межах -20 °C...0 °C та час перебування у зоні небезпеки більший ніж 0,5 години. Комплекс може бути адаптований для конкретних типів повітряних суден;

– за результатами роботи подано дві заяви на винаходи й отримано патенти на корисні моделі:

- спосіб виявлення ЗНО літаків і вертольотів [10];

- пристрій для виявлення ЗНО літаків і вертольотів [11];

– наведені у дисертації розрахунки поляриметричних параметрів електромагнітних хвиль (Додаток 5.1, 5.2), що відбувається від складних метеорологічних утворень, є корисними для практичного застосування в:

- інформаційному метеорологічному забезпечені безпеки польотів повітряних суден для розпізнавання небезпечних метеорологічних явищ;

- метеорології для дослідження природних процесів, що впливають на зміну погоди і підвищення точності прогнозів;

- гідрологічних і кліматологічних дослідженнях для оцінювання кількісних та якісних характеристик хмар та опадів;

- інформаційних системах передавання та оброблення даних за адаптації для конкретних умов поширення радіохвиль.

Розроблені математичні моделі та алгоритми моделювання для виявлення зон небезпечної обледеніння повітряних суден в залежності від параметрів інформаційної метеорологічної системи, умов зондування і характеристик об'єкта спостереження реалізовано в пакеті прикладних програм на мові MatLab, упроваджені в практику наукових досліджень, зокрема за проектом № 685-ДБ-10, номер держреєстрації 0104U000674 (дод. 4).

Достовірність наукових результатів забезпечується і підтверджується коректним використанням методів досліджень і збіжністю результатів моделювання, натурних експериментів і теоретичних досліджень [32, 33].

Особистий внесок здобувача. Безпосередньо автором дисертації створено математичну модель, що дозволяє розраховувати поляриметричні параметри сигналу, відбитого від різних типів хмарних частинок і за різних умов, наприклад: частота використовуваного сигналу, типи частинок, їх форма і розподіл за розмірами в хмарі, відсоткове співвідношення та ін. На підставі аналізу математичної моделі автором цієї роботи визначено зв'язки і знайдено залежності між умовами виникнення зони можливого обледеніння ПС і параметрами сигналу, відбитого від хмарних частинок у такій зоні. Розроблено оригінальні алгоритми і наведено аналіз умов їх застосовності для різних сценаріїв формування ЗНО, створено рекомендації щодо їх практичного застосування. Результати, що становлять основний зміст дисертації, отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: в [12, 13] наведено уточнені формули, що описують поляриметричні параметри радіолокаційного сигналу, відбитого від еліптичних розсіювачів; у [14] описано такий підхід до оцінювання поляриметричних параметрів відбитого від метеооб'єкта сигналу радіолокатора, який дає змогу уникнути необхідності володіння апріорною інформацією про статистичні закони розподілу досліджуваних об'єктів; у [15] проведено теоретичний аналіз оцінювання ефективності різних алгоритмів виявлення ЗНО; у [16] обґрунтовано межі застосування алгоритмів виявлення небезпечних для польоту зон на підставі наявних моделей їх формування; у [17] виконано поглиблений аналіз причин формування ЗНО та їх впливу на ПС під час польоту; у [18] наведено основні тези поляриметричного підходу до процесу виявлення ЗНО; у [26, 27] показано можливість побудови математичних моделей, що описують поляриметричні параметри сигналу, відбитого від рідких крапель і кристалів льоду; у [33, 35, 37] наведено теоретичні оцінювання поляриметричних параметрів радіолокаційних сигналів, відбитих від сукупності (хари) частинок різних типів; в інших публікаціях [12 – 37], що не описані детально

вище, також наведено різні тези доповідей на міжнародних конференціях з теми дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Експериментальну перевірку теоретичних досліджень виконано на основі аналізу даних радіолокаційного дослідження хмар і опадів метеорологічними радіолокаторами TARA і PARSAХ (Нідерланди). Результати перевірки показали цілком задовільну збіжність між теорією і практикою. Основні положення і результати виконаних в дисертації досліджень доповідалися автором і обговорювалися на 9 міжнародних наукових конференціях у Києві, Дніпропетровську, Харкові, Одесі, Парижі, Манчестері, Нюрнберзі та Дрездені: The 10th Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2004), вересень 2004, Дніпропетровськ, Україна; International Workshop on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS 2005), Київ, Україна, вересень 2005; The 2nd European Microwave Week (EuMW-2005), Париж, Франція, жовтень 2005; The 11th Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2006), Харків, Україна, червень 2006; The 3rd European Radar Conference (EuRad-2006), Манчестер, Великобританія, жовтень 2006; IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2011), Київ, Україна, серпень 2011; 14-а Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні Інформаційні та Електронні Технології» CIET 2013, травень 2013, Одеса; The 8th European Radar Conference (EuRad-2013), жовтень 2013, Нюрнберг, Німеччина; The 10th Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2014 року), серпень 2014, Дніпропетровськ, Україна; IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2014), Київ, Україна, серпень 2014; International Radar Symposium (IRS-2015), Дрезден, Німеччина, червень 2015.

Крім того, результати дисертації обговорювалися на науково-технічних семінарах кафедри електроніки, міжкафедральних семінарах (2013-2014) і наукових конференціях молодих учених «Політ» і «Високі технології», які проводилися в Національному авіаційному університеті. За результатами дисертаційних досліджень отримано 2 патенти України на корисну модель [10, 11].

Публікації. Основні положення і зміст дисертації відображені в 27 наукових публікаціях. Із них 4 статті у фахових журналах (три одноосібні), 2 – за кордоном, 19 наукових статей в рецензованих роботах міжнародних конференцій. Стаття [15] була визнана кращою, а автор нагороджений як переможець конкурсу серед молодих вчених. У наукометричній базі Scopus 21 публікація автора, індекс Хірша h=4.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 215 сторінок, включаючи 105 рисунків і 8 таблиць, список використаних джерел з 123 найменувань на 9 сторінках та 50 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

ОБЛЕДЕНІННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ЯК НЕБЕЗПЕЧНЕ МЕТЕОРОЛОГІЧНЕ ЯВИЩЕ

1.1. Загальні відомості

Наведемо термінологічну базу та визначення основних понять у сфері захисту від обледеніння літаків і вертолітів.

Згідно з працею [38] природне обледеніння літака (гелікоптера) – це утворення льоду на поверхні літака (гелікоптера) під впливом атмосферних умов у переохоложених хмарах, дощі, тумані. Умовами обледеніння літака вважається сукупність атмосферних умов – водності, температури, діаметра крапель, атмосферного тиску, а також швидкості польоту ПС, під час якої спостерігається його обледеніння.

Розглянемо випадок обледеніння ПС під час польоту. Під час входження ПС в зону, яка містить переохоложенні краплі води, може спостерігатися відкладення льоду на обтічних частинах судна, засклення кабіни пілотів (рис. 1.1), силових установках і зовнішніх деталях його спеціального обладнання (антени, люки та ін., рис. 1.2). Найбільш інтенсивне обледеніння спостерігається там, де більша водність і більші краплі.



Рис. 1.1. Обледеніння кабіни пілотів, що погіршує оглядовість і ускладнює посадку [39]

Залежно від інтенсивності відкладення льоду обледеніння вважається слабким, коли лід відкладається із швидкістю 0,01...0,5 мм/хв, середнім – 0,5...1,0 мм/хв, сильним – понад 1,0 мм/хв [40]. Іноді швидкість обледеніння може досягати 5...6 мм/хв і навіть більше [41]. Інтенсивність обледеніння залежить від водності (кількості води, що знаходиться в рідкій фазі в одиниці об'єму повітря) хмар, їх агрегатного стану, розмірів водяних крапель, швидкості польоту, профілю крила літака й інших факторів, урахувати які не завжди можливо.



Рис. 1.2. Відкладення льоду, що перешкоджають закриттю люка [112]

У результаті відкладення льоду спотворюється форма профілю крила й оперення, що призводить до погіршення аеродинамічних якостей літака, до втрати його стійкості. Так, для деяких типів літаків відкладення на передній кромці крила льоду товщиною не більше ніж товщина наждачного полотна можуть викликати втрату піднімальної сили до 30% і збільшити аеродинамічний опір до 40% [44].

1.2. Умови виникнення зони небезпечного обледеніння

Обледеніння можливе за температур $+2\ldots-50^{\circ}\text{C}$ у хмарах, тумані або опадах. Як показує статистика, найбільша кількість випадків обледеніння літаків відбувається за температур $0\ldots-20^{\circ}\text{C}$, особливо $0\ldots-10^{\circ}\text{C}$, а швидкісних літаків – і за нижчих

температур. Обледеніння ж газотурбінних двигунів може відбуватися і за позитивних температур – 0...+5 °C, а іноді і вище [41, 43].

Обледеніння літака зазвичай може відбуватися внаслідок двох причин.

Першою і основною причиною обледеніння є замерзання переохоложених крапель, які стикаються з поверхнею літака. Хмарні краплі зазвичай перебувають у підвішеному стані, і зіткнення з ними припадає лише на передні частини літака, звернені до зустрічного потоку. Унаслідок цього утворення лід утворюється відбувається головним чином на лобових частинах літака і лопатях гвинтів. На решті поверхні відкладення льоду трапляється порівняно не часто, головним чином в умовах переохоложеного дощу [41].

Другою причиною є безпосереднє відкладення крижаних кристалів (сублімація) на поверхні літака. Цей вид обледеніння спостерігається, коли температура поверхні літака виявляється значно нижчою від температури навколошнього повітря. Така ситуація може трапитись, наприклад, під час швидкого зниження літака з верхніх шарів атмосфери в тепліші нижні шари або під час входження в шар температурної інверсії. У цьому випадку на літаку утворюється слабкий інієподібний наліт, який зникає через деякий час після того, як температура літака зрівняється з температурою навколошнього повітря [41, 42]. Іній на літаку може відкладатися і під час польотів у безхмарному, але наасиченому водяними парами повітрі.

Головною причиною обледеніння газотурбінних двигунів є замерзання переохоложених капель. Однак іноді у вхідному каналі двигуна температура може знижуватися на 8...10 °C під час польоту поза хмарами за рахунок розширення повітря, що туди надходить. Таке явище може спостерігатися за швидкості літака меншої за 450 км/год, але за високих оборотів двигуна, наприклад, на зльоті. У цьому випадку замість підтиснення повітря на вході відбувається його засмоктування і розширення [41]. Більш детальну інформацію про умови виникнення ЗНО наведено у дод. 1. Так, у *підрозділі 1.3 дод. 1* показано вплив деяких параметрів ПС та навколошнього середовища на можливість обледеніння, зокрема проаналізовано такі фактори [42, 45]:

- температура і вологість повітря;
- водність і форма хмар;
- розмір крапель;
- висота та швидкість польоту ПС;
- профіль крила;
- час перебування літака в зоні обледеніння.

У *підрозділі 1.3 дод. 1* також показано, що з усієї сукупності факторів, що впливають на ймовірність виникнення ЗНО, можна виділити три головні [46]:

- *наявність як мінімум від'ємної температури повітря;*
- *наявність водяних крапель з великим середнім діаметром (більше ніж 30 мк);*
- *достатньо велике значення середньої водності хмари.*

1.3. Актуальність проблеми раннього виявлення зони небезпечного обледеніння

У *підрозділі 1.1 дод. 1* детально проаналізовано вплив обледеніння на аеродинамічні якості літака і безпеку польотів. Як можна бачити з цього розділу, негативні ефекти обледеніння можуть поширюватись як на елементи планера ПС, так і на роботу двигунів, і значно погіршувати (включаючи унеможливлення) здатність ПС виконувати свої функції [41, 43, 44].

У *підрозділі 1.2 дод. 1* проаналізовано механізм утворення льодяного шару на поверхні ПС і показано, які типи відкладень є більш небезпечними і чому [41, 42].

У *підрозділі 1.4 дод. 1* наведено класифікацію протиобрідновальних систем та показані методи їх роботи. Показано, що наявність протиобрідновальної системи не завжди гарантує безпеку від обледеніння ПС у польоті навіть для великих магістральних лайнерів [3], не кажучи про менш захищенні невеликі форми повітряних суден [44], в тому числі гелікоптери та особливо безпілотні апарати, які не можуть бути обладнані повноцінними протиобрідновальними системами через їх менший розміру і потужність.

Як можна бачити з *підрозділу 1.4 дод. 1*, в арсеналі сучасного ПС є ряд засобів та інженерних рішень, спрямованих на боротьбу з таким небезпечним

метеорологічним явищем, як обледеніння [43]. Водночас слід визнати, що ефективність існуючих рішень недостатня. Наведемо уривок зі статті журналу «Авиатранспортное обозрение» (№ 79, травень 2007 року) [3]:

«На певних типах літаків крило спочатку досить добре захищене від наростання льоду, тому пілотам не потрібно вмикати протиоблідновальні системи в попереджувальних цілях. До таких типів ПС, безумовно, належать транспортні важковаговики. Наприклад, навіть коли Boeing 727 входить у зону з несприятливими умовами зледеніння, об'єму гарячого повітря, що відводиться від двигунів, цілком достатньо для розтоплення льоду на передніх крайках крила. Способи боротьби з обледенінням і варіанти дій пілота в подібних ситуаціях, правильні для пілотування великого авіалайнера, можуть виявитися невідповідними для літака із зовсім іншою конфігурацією обладнання, що включає, наприклад, термоелектричні протиоблідновальні шини, використовувані на турбогвинтових машинах, що може призвести до істотних проблем... Деякі системи захисту від льоду повинні застосовуватися тільки в упереджувальному режимі. Наприклад, якщо пілот Hawker 800 буде чекати, поки на крилах накопичиться лід, щоб увімкнути антиоблідновальну систему TKS (це титанові панелі з багатьма просвердленими лазером дрібними отворами, через які просочується рідина на основі етиленгліколю), у нього виникнуть істотні неприємності. У керівництві з експлуатації даного літака ясно вказано, що перед польотом TKS необхідно заправити, а вмикати її слід перед входженням в зону обледеніння. Увімкнення TKS після обледеніння крил часто не призводить до бажаного результату».

У *підрозділі 1.5 дод. 1* наведено приклад ще однієї з авіаційних пригод, що привела до втрати людських життів та екіпажу ПС, обладнаного штатною системою боротьби з обледенінням [47].

З наведеного вище матеріалу можна зробити висновок, що для успішної боротьби з обледенінням ПС необхідно навчитися прогнозувати можливу загрозу обледеніння. Якщо пілот буде завчасно поінформований про наявність ЗНО по курсу проходження ПС, можливий вибір оптимального алгоритму дій у кожній конкретній ситуації. Так, наприклад, для великих магістральних авіалайнерів, які

використовують досить енерго- і ресурсоємні методи боротьби з обледенінням, можна буде завчасно і на необхідну потужність вмикати протиобрізновальну систему, щоб не допустити утворення товстого шару льоду на корпусі або крилах ПС. Це дозволить знізити експлуатаційні витрати і підвищити економічність і конкурентоспроможність авіаперевезень порівняно з варіантом, коли протиобрізновальна система вмикається щоразу за найменшої підоцрі щодо можливості обледеніння ПС, наприклад, при входженні в хмарний фронт за мінусової температури. Це може також підвищити безпеку польотів – якщо протиобрізновальна система вмикається автоматично тільки тоді, коли процес обледеніння вже почався, потужності штатної протиобрізновальної системи може просто не вистачити. Відомі випадки, коли швидкість наростання льоду на поверхні крил досягала 50 мм/хв [48]. При площині крил сучасних лайнерів близько двох-трьох сотень квадратних метрів, це утворює декілька тон додаткового навантаження. Утім небезпечне навіть не навантаження, а зміна аеродинамічної форми крила, втрата піднімальної сили і керованості ПС. Крім того, на деяких типах літаків унаслідок конструктивних особливостей компонування, можуть відколюватися великі шматки льоду з передньої кромки крил, які можуть потрапляти у хвостове оперення або в двигун (для ТУ-134, ТУ-154) і призводити до лютних пригод або навіть катастрофи. Особливо актуальною ця проблема може бути для пілотів середніх і малих ПС, які не мають складних і енергоємних протиобрізновальних систем. Маючи інформацію про наявність попереду ЗНО, можна прийняти рішення про зміну висоти / курсу, щоб уникнути аварійної ситуації.

Таким чином, першорядного значення набуває завдання раннього виявлення ЗНО під час польоту. Відомий спосіб попередження екіпажу ПС про небезпеку обледеніння за допомогою радіоізотопних сигналізаторів обледеніння, наприклад, РІО-3, датчики яких установлюють в повітробірниках двигунів АІ-25. Однак цьому способу притаманні недоліки, які полягають в низькій надійності і несвоєчасності подачі сигналів про небезпеку обледеніння для інформування екіпажу і ввімкнення протиобрізновальної системи. Цей спосіб принципово працездатний тільки тоді, коли повітряне судно вже увійшло в ЗНО і процес обледеніння почався.

Через зазначені недоліки автоматичний режим роботи протиобліднювальної системи на практиці часто не використовують, а включають її в режим обігріву в умовах можливого обледеніння, яке прогнозується за повідомленнями рейсовых екіпажів і даними синоптиків [49].

1.4. Постановка завдання ранньої діагностики зон імовірного обледеніння з борту повітряного судна

Метеорологічні об'єкти є досить динамічними утвореннями, стан яких може значно змінюватися за короткий проміжок часу. Крім того, ПС у процесі польоту може відхилятися від початкового курсу. Найбільш прийнятним варіантом слід визнати отримання інформації в режимі реального часу про наявність/відсутність ЗНО прямо по курсу. Отримувати таку інформацію можна, аналізуючи структуру метеооб'єктів за допомогою бортового метеорадіолокаційного обладнання [8].

Найефективнішим з усіх існуючих натепер способів попередження обледеніння ПС у реальному часі можна визнати відомий спосіб виявлення ЗНО з використанням бортових метеонавігаційних радіолокаторів в режимі виявлення гідрометеоутворень [39, 49]. Він полягає у формуванні голчастої діаграми напрямленості (ДН) антени, випромінюванні імпульсів електромагнітних коливань (зазвичай з вертикальною поляризацією), прийманні відбитих сигналів (тієї ж поляризації), детектуванні обвідної сигналів, посиленні їх і яскравісному відображення на екрані локатора з радіально-секторною (радіально-круговою) розгорткою. Відбиті від цілі сигнали створюють на екрані локатора характерні засвічення, які може розрізняти оператор (пілот). При цьому майже всі виявлені хмари вважаються ЗНО, у той час як обледеніння ПС, як відомо, відбувається тільки за наявності переохолоджених водяних крапель. Зазначений недолік призводить до невиправдано високого рівня хибних тривог при локалізації ЗНО цим способом, що знижує регулярність польотів і спричиняє погіршення економічних показників повітряного транспорту (локалізацією ЗНО будемо називати процес їх виявлення і віднесення до певних просторових координатів в заданий час на підставі результатів дистанційного зондування).

Отже, необхідно знайти спосіб підвищення достовірності локалізації небезпечних для польоту зон, практична реалізація якого може бути виконана шляхом модернізації існуючого радіолокаційного обладнання ПС за допомогою модуля розширення функціональності або окремого пристрою для локалізації ЗНО. Розглянемо деякі аспекти функціонування такого приладу [11]:

Робочий діапазон частот. Максимальний зареєстрований розмір дощових крапель досягає близько 8 мм, кристалів льоду – близько 10 мм [50, 51, 52]. Довжина хвилі зондувального імпульсу для ефективного дослідження таких об'єктів має бути порівняно близькою до розмірів частинок [52, 53]. Крім того, поглинання радіохвиль обраного діапазону під час поширення через хмари й опади не повинно бути надмірно великим, щоб забезпечити прийнятні потужність випромінювання і дальність дії [51]. Досить зручно проводити дослідження в сантиметровому діапазоні частот [51, 53]. Згідно з міжнародним розподілом радіочастот для метеонавігаційних радіолокаційних станцій (МНРЛС) виділено певний діапазон частот в Х-діапазоні в районі 9345 і 9375 МГц [8, 40].

Дальність дії. Оскільки такі метеорологічні утворення, як хмари можуть мати протяжність десятки кілометрів, енергія сигналу повинна бути досить великою, зважаючи на значне поглинання електромагнітного випромінювання.

Для прийняття рішення про зміну висоти чи маршруту або про ввімкнення протибліднюючих систем пілоту потрібен якийсь час. Протибліднюючі системи також мають деяку інерційність і потребують деякого часу для виходу в стаціонарний режим роботи. Отже, розрахункова дальність дії бортового метеорадіолокатора визначається часом входження в небезпечну зону. Цей параметр, у свою чергу, залежить від типу і швидкості ПС, наявності / відсутності штатних протибліднюючих систем і їх конструктивних особливостей.

Вибір типу антени. Видеться очевидним, що прогрес рухається в бік відмови від дзеркальних антен і механічного сканування до використання фазованих антенних решіток. Якщо ставити за мету створення компактного недорогого пристрою, імовірно, доцільно відмовитися від громіздкого і важкого вузла механічної розгортки променя і дзеркальної антени. Разом з тим решітки теж мають ряд недоліків і досить

дорогі щодо можливості їх застосування на малих ПС цивільної авіації. Відомий приклад можливого використання компактної антени з ДН віялового або голчастого типу [54]. Як розподілений метеооб'єкт зона ймовірного обледеніння може мати надто розмиті межі, і велика точність визначення кутових координат тут не потрібна. Найбільш значущим є визначення точної ідентифікації фазового стану води в хмарі. Великі можливості для визначення типу частинки надає поляриметричний метод, суть якого – використання сигналів з ортогональною поляризацією [8, 51].

Для того щоб процес обледеніння почався, необхідна наявність переохолоджених водяних крапель (*Supercooled Liquid Water Drops, SLWD*) [46, 55]. Такі частинки матимуть сферичну форму, близьку до ідеальної. Отже, потужності зондувального (P_{HH}) і відбитого (P_{VV}) сигналів (індекси « HH » і « VV » означають поляризацію імпульсів) будуть майже однакові. Кросполяризаційна складова P_{HV} буде близька до нуля [56]. Водночас для таких об'єктів, як дощ (помірний або сильний) або сніг, що не являють собою загрози щодо можливого обледеніння ПС, значення P_{HH} , P_{VV} і P_{HV} будуть матимуть певний діапазон і визначатимуться формою, а також орієнтацією осей симетрії частинок, що входять до складу цих метеооб'єктів [10, 11].

Поляриметричний підхід. Беручи до уваги наведені вище аргументи, можна стверджувати, що одним з перспективніших для практичної реалізації методу виявлення ЗНО є поляризаційний підхід. Звичайна метеорологічна навігаційна радіолокаційна станція (МНРЛС) випромінює і приймає лінійно поляризоване електромагнітне випромінювання (ЕМВ) з постійною поляризацією. На відміну від звичайної МНРЛС, найпростіший поляриметричний радіолокатор може випромінювати і приймати лінійно поляризоване ЕМВ із заданою орієнтацією вектора електричного поля в одній з двох ортогональних площин (умовно кажучи, горизонтальної або вертикальної) за автоматичного управління поляризацією сигналу на передавання і приймання [57, 58].

Ортогонально поляризовані імпульси ЕМВ переключаються у швидкому темпі (зазвичай від імпульсу до імпульсу), у той час як радіолокаційний промінь сканує ту ділянку метеорологічного утворення, яка становить потребу [56].

У результаті оброблення сигналів і аналізу відмінностей потужності зворотного розсіяння у процесі випромінювання ортогонально поляризованих імпульсів може бути отриманий великий обсяг інформації про частинки, що містяться в межах об'єму, що сканує промінь локатора [57, 59, 60, 61]. Зокрема, може бути отримана інформація про форму та розміри частинок, їх щільність у хмарі та ін. Правильно використовуючи цю інформацію, за допомогою вдосконалених наземних поляриметричних метеорадіолокаторів [62, 63] вдається з великою ймовірністю визначати тип гідрометеорів, а також наявність об'єктів, що розсіюють електромагнітні хвилі і мають негідрометеорологічне походження у спостережуваному радіолокаційному об'ємі [56].

Для забезпечення безпеки польотів необхідно, щонайменше, вирішити бінарну задачу виявлення умов обледеніння в досліджуваному обсязі зони огляду бортової МНРЛС.

Бінарна багатопараметрична задача локалізації ЗНО [4, 40]. Використання поляриметричного радіолокатораaprіорі передбачає реалізацію багатопараметричних радіолокаційних задач, будь то задача виявлення, оцінювання параметрів або їх класифікації. Тому поляриметричні радіолокатори часто називають багатопараметричними (*multi-parametric radar*) [40].

Відповідно до праці [40] ЗНО можна розглядати як об'ємно розподілені об'єкти, які займають певні просторові зони в хмараах і опадах.

Нехай Ω - множина станів метеооб'єкта, яка може бути охарактеризована щільністю ймовірності $p(\omega)$, причому ймовірність будь-якого конкретного стану (наприклад, стану ω_1 - наявність ЗНО) можна записати в такий спосіб:

$$P(\omega_1) = \int_{\Omega_1} p(\omega)d(\omega), \quad (1.1)$$

де Ω_1 - частина множини Ω , що належить до стану ω_1 .

Нехай на основі вимірювання вектора інформативних параметрів (ІП) перевіряється гіпотеза про наявність ЗНО проти альтернативи – відсутності ЗНО.

Далі будемо розглядати такі задачі, у яких значення ІП характеризують у певний час одну «точку» простору, тобто мінімальну частину метеорологічного об'єкта із заданими координатами, яку дозволяє виділити роздільна здатність вимірювальних засобів. Нехай $p(\vec{X} / \omega_i)$ – щільність імовірності появи вимірюваного значення вектора ІП \vec{X} за умови, що об'єкт перебуває в стані ω_i . За значенням \vec{X} , що спостерігається буде прийняті рішення α за допомогою деякої вирішальної функції $\tilde{\alpha}(\alpha / \vec{X})$. У просторі рішень є всього дві точки – $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$, які відповідають двом можливим рішенням: α_1 – наявність ЗНО, α_2 – її відсутність.

Оптимальне правило прийняття рішення розбиває весь простір спостережень на дві підобласті: Γ_1 і Γ_2 . При цьому рішення α_1 приймається в разі коли $\vec{X} \in \Gamma_1$, Рішення α_2 – коли $\vec{X} \in \Gamma_2$. Таким чином, можна записати вираз для використованого правила прийняття рішень

$$(\alpha_i / \vec{X} \in \Gamma_i) = \delta_{i,j}, \quad i, j = 1, 2, \quad (1.2)$$

де $\delta_{i,j}$ – символ Кронекера:

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (1.3)$$

Якість локалізації ЗНО будемо характеризувати умовними ймовірностями правильної локалізації

$$D = P(\alpha_1 / \omega_1) = 1 - \int_d \tilde{d}(\alpha_2 / \vec{X}) p(\vec{X} / \omega_1) d\vec{X}, \quad (1.4)$$

і хибної тривоги

$$F = P(\alpha_1 / \omega_0) = \int_d \tilde{d}(\alpha_1 / \vec{X}) p(\vec{X} / \omega_0) d\vec{X}. \quad (1.5)$$

Уведемо дискримінантну функцію $y(\vec{X})$, використовуючи відношення правдоподібності

$$y(x) = \ln[p(\vec{X} / \omega_0) / p(\vec{X} / \omega_1)]. \quad (1.6)$$

Тоді поріг \tilde{K} , що розділяє простір Γ на підобласті Γ_1 і Γ_2 , визначається, наприклад, з критерію мінімуму середнього ризику [38]

$$\tilde{k} = p_0[C(\omega_1, \alpha_2) - C(\omega_1, \alpha_1)] / q_0[C(\omega_0, \alpha_1) - C(\omega_0, \alpha_2)], \quad (1.7)$$

де $p_0 = P(\omega_1)$ і $q_0 = 1 - p_0 = P(\omega_0)$ – априорні ймовірності станів ω_1 і ω_0 , а елементи матриці вартості рішень

$$C(\omega_i, \alpha_i) = \begin{vmatrix} C(\omega_1, \alpha_1) & C(\omega_0, \alpha_1) \\ C(\omega_1, \alpha_2) & C(\omega_0, \alpha_2) \end{vmatrix} \quad (1.8)$$

дають усереднені вартісні оцінки наслідків для кожного варіанта прийнятого рішення у всіх ситуаціях. Якщо спеціально не обумовлено, то ці оцінки належать до всіх типів ПС. Більш точні результати можуть бути забезпечені, якщо елементи матриці вартості $C(\omega_i, \alpha_i)$ диференціювати за типами ПС [23].

Задача оптимальної класифікації метеооб'єктів стосовно зони небезпечної турбулентності була вирішена у працях [5, 22]. Аналогічний підхід можна застосовувати і для ЗНО. Якщо умовна k -вимірна щільність імовірності $p(\vec{X}/\omega_j)$ описується багатовимірним гаусовим розподілом, то вираз для дискримінантної функції можна отримати в кінцевому аналітичному вигляді. Нехай

$$p(\vec{X}/\omega_j) = \frac{1}{(2\pi)^{k/2} |\mathbf{K}^{(j)}|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [\vec{X} - \vec{b}^{(j)}]^T |\mathbf{K}^{(j)}|^{-1} [\vec{X} - \vec{b}^{(j)}] \right\}, \quad (1.9)$$

де $\vec{b}^{(j)}$ – середнє значення вектора ІП \vec{X} в підобласті Γ_j ; $\|K^{(j)}\|$ – ковариаційна матриця вектору ІП у тій же підобласті; $|K^{(j)}|$ – визначник матриці $\|K^{(j)}\|$; верхній індекс Т означає виконання операції транспонування.

Підставивши вираз (1.7) у формулу (1.4), отримаємо [38]:

$$\vec{y}(\vec{X}) = \vec{a} + \sum_{m,n=1}^k b_{mn} X_m X_n + \sum_{n=1}^k d_n X_n + \sum_{m=1}^k C_m X_m, \quad (1.10)$$

де

$$a = -\frac{1}{2} \ln \frac{|K^{(0)}|}{|K^{(1)}|} + \frac{1}{2} \sum_{m,n=1}^k \left\{ \chi_{mn}^{(1)} b_m^{(1)} b_n^{(1)} - \chi_{mn}^{(0)} b_m^{(0)} b_n^{(0)} \right\}, \quad (1.11)$$

$$b_{mn} = \frac{1}{2} \left[\chi_{mn}^{(1)} - \chi_{mn}^{(0)} \right], \quad (1.12)$$

$$C_m = -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^k \left[\chi_{mn}^{(1)} b_n^{(1)} - \chi_{mn}^{(0)} b_n^{(0)} \right], \quad (1.13)$$

$$d_n = -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^k \left[\chi_{mn}^{(1)} b_m^{(1)} - \chi_{mn}^{(0)} b_m^{(0)} \right], \quad (1.14)$$

причому $\chi_{mn}^{(j)}$ – елемент матриці $\|K^{(j)}\|^{-1}$.

Таким чином, маючи вектори $\vec{b}^{(j)}$ і матриці $\|K^{(j)}\|$, можна за формулами (1.11) – (1.14) розрахувати коефіцієнти дискримінантної функції $y(\vec{X})$ у формі (1.10), яка оптимальним чином поєднує всі інформативні параметри X_1, X_2, \dots, X_k – компоненти вектора \vec{X} . Цей розв’язок не тільки дозволяє використовувати значення порога поділу \tilde{K} , знайдене за апрайорними даними, наприклад, з використанням матриці вартості для мінімального середнього ризику (1.7), але і створює методичну можливість вибирати

такий (неоптимальний) поріг поділу ситуацій, за якого може бути досягнута задана достовірність локалізації ЗНО.

Задача оцінювання достовірності локалізації ЗНО у наведеній постановці зводиться, по суті, до обґрунтування оптимального (прийнятного) вектора ІП \vec{X} в рамках прийнятої моделі, визначення статистичних характеристик цих параметрів в ситуаціях ω_1 і ω_0 , і оцінювання ймовірностей правильного (D) і хибного (F) рішень залежно від значень порогового рівня y_0 [38]. У разі негаусових моделей розподілу ІП при синтезі алгоритмів локалізації також можуть бути отримані конкретні вирази дискримінантної функції.

Задачі дослідження. Наведена постановка задачі бінарної багатопараметричної локалізації ЗНО за формулами (1.1–1.14) визначає мінімальний ряд завдань, які необхідно вирішити для розроблення методу виявлення ЗНО, придатного для реалізації в бортовій МНРЛС.

Так, потрібно виконати теоретичні та експериментальні дослідження поляризаційних характеристик радіолокаційних сигналів, відбитих від метеорологічних утворень. У результаті цих досліджень необхідно розробити моделі зв'язку поляриметричних характеристик сигналів з ЗНО і визначити вимірювані радіолокаційні змінні, складові вектора ІП $\vec{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ і є ознаками ЗНО.

Необхідно оцінити умовну щільність ймовірності розподілу $p(\vec{X}/\omega_i)$ вектору ІП в умовах наявності і відсутності умов обледеніння і, по можливості, інші статистичні характеристики.

Отримані дані слід покласти в основу розроблення *методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО* для отримання інформації про наявність чи відсутність ЗНО в досліджуваному обсязі метеорологічного об'єкта.

Необхідно дослідити вплив параметрів ПС та маршруту польоту (температура повітря за бортом, висота польоту, швидкість, час перебування у зоні небезпеки) на ймовірність обледеніння у разі потрапляння ПС у зону потенційного обледеніння. Отримані дані слід покласти в основу розроблення *методу багатофакторної оцінки ступеня загрози обледеніння* для підвищення точності прийняття рішень щодо

наявності ЗНО. Схематично задачі дослідження показано на рис. 1.3. На темному фоні виділено нові методи, що має бути розроблено для розпізнавання ЗНО.

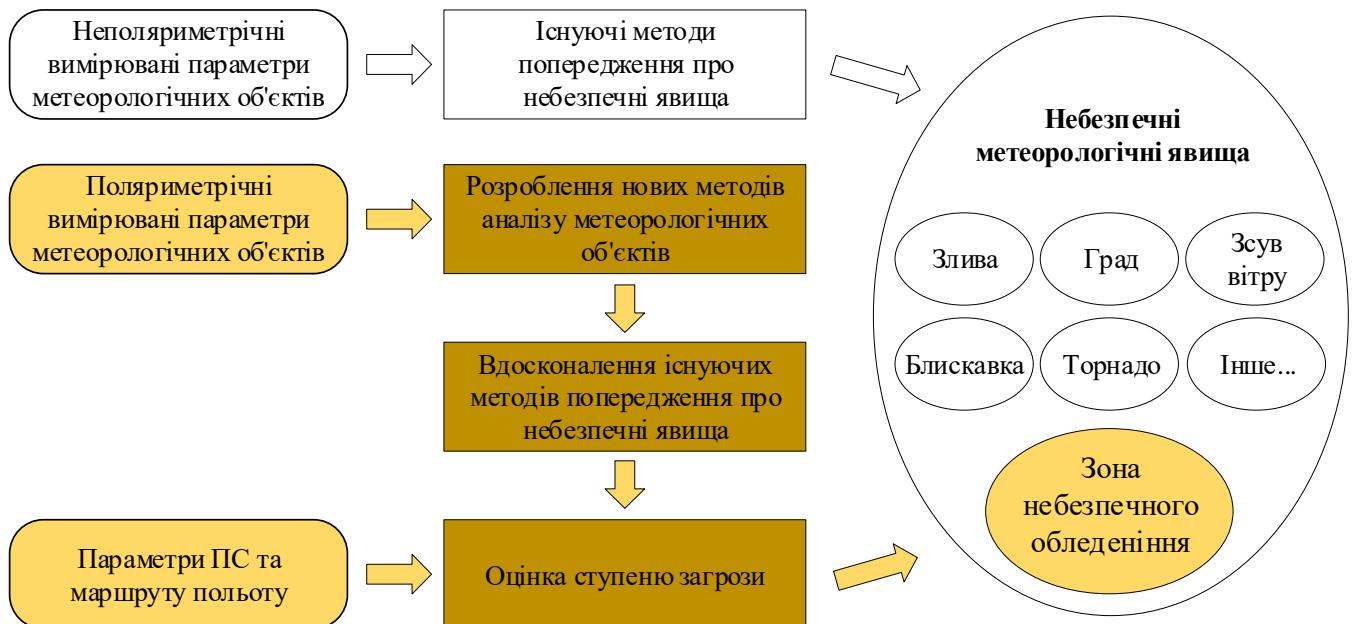


Рис. 1.3. Структурно-логічна схема інформаційної технології розпізнавання НМЯ

Крім того, необхідно розробити методику оцінювання достовірності алгоритмів виявлення ЗНО й оцінити достовірність синтезованого алгоритму.

З метою реалізації поляриметричного підходу для розширення функціональних можливостей і підвищення ефективності МНРЛС при локалізації зон НМЯ важливо проаналізувати можливості практичного застосування поляриметричного методу виявлення зон імовірного зледеніння в бортових радіолокаторах і дати рекомендації щодо його реалізації.

Висновки до первого розділу

У підсумку, ми приходимо до такої концепції оптимального методу протидії обледеніння ПС з точки зору відношення витрат і ефективності віддачі: необхідно знайти спосіб оперативного визначення зони підвищеної небезпеки, використовуючи дані про метеорологічну обстановку по курсу прямування ПС, отримувані за допомогою бортового поляриметричного радіолокатора. Маючи цю інформацію, можна скласти оптимальний алгоритм дій. Алгоритм повинен враховувати такі

фактори, як тип повітряного судна, оснащеність його засобами захисту, інтенсивність передбачуваного обледеніння, висоту, швидкість, температуру за бортом і ін.

Виконана постановка завдання виявлення ЗНО передбачає необхідність вирішення таких завдань:

1. Розробити математичну модель зв'язку поляриметричних характеристик гідрометеорів з параметрами ЗНО.
2. Вибрati й обґрунтuvati ряд змінних, які будуть складати вектор інформативних параметрів і можуть бути використані для розроблення *методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО*.
3. Оцінити умовну щільність імовірності розподілу $p(\vec{X}/\omega_j)$ вектора П в умовах наявності і відсутності умов обледеніння.
4. Розробити *метод багатофакторної оцінки ступеня загрози обледеніння*, оцінити його ефективність і умови застосування.

Матеріали цього розділу відображені в публікаціях автора [16, 17, 19, 23] та деяких інших працях.

Список використаних джерел у першому розділі

1. Appiah-Kubi, Philip. U.S Inflight Icing Accidents and Incidents, 2006 to 2010 / A Thesis Presented for the Master of Science Degree The University of Tennessee. Knoxville, 2011.
2. Leifeld C. ADWICE - ADVANCED DIAGNOSIS AND WARNING SYSTEM FOR AIRCRAFT ICING ENVIRONMENTS // Leifeld C., Hauf T., Tafferner A. and Leykauf H. [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://ams.confex.com/ams/pdffiles/39066.pdf>.
3. Вейлетт П. «Авиатранспортное обозрение», приложение «Деловая авиация» / Патрик Р. Вейлетт «Даже самым опытным пилотам нужны дополнительные знания и навыки» // [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://www.ato.ru/content/s-tipa-na-tip-kachestvo-pereobucheniya>.

4. Браун И.М. «Поляриметричне виявлення градових зон бортовими метеонавігаційними радіолокаторами» / дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. НАУ, К.: 2004.
5. Yanovsky F.J. Doppler-polarimetric retrieval of rain rate and turbulence intensity in precipitation / International Conference «Mathematical Methods in Electromagnetic Theory» // К.: 2002. С. 281-286.
6. Yanovsky F.J. Doppler-Polarimetric Radar Observations of Turbulence in Rain. / Yanovsky F.J., Unal C.H.M. and Russchenberg H.W.J. // Proceeding of the World Congress "Aviation in the XXI-st Century". К.: 2003. С. 5.8 – 5.14.
7. Pokrovsky V.I. Airborne Weather Radar for Windshear Detection / Pokrovsky V.I., V.V. Belkin, F.J. Yanovsky // Conference Proceedings 18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications ICECom. Дубровник, Хорватія: 2005. – С. 357-360.
8. Яновский Ф.И. «Радиолокализация опасных метеоявлений с борта воздушного судна» / Докторська дисертація. К.: КІГА, 1991. – 522 С.
9. Яновский Ф.И. «Бортовые метеонавигационные радиолокаторы. Физические основы, основные параметры и принципы построения». - К.: КІГА, 1982. – 82 С.
10. Пітерцев О.А., Яновський Ф. Й. Патент України на корисну модель № 98228 «Спосіб визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» від 27.04.2015.
11. Пітерцев О.А., Яновський Ф. Й. Патент України на корисну модель № 100763 «Пристрій для визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» від 10.08.2015.
12. Pitertsev A.A. The Analytical Method of Polarimetric Variables Prediction in The Case of Remote Sensing of Ice Crystals Clouds / Journal “Electronics and Control Systems”. К.: НАУ. – 2017. – №51. С. 24-29.
13. Pitertsev A.A. Refined Models and Numerical Simulation of Polarimetric Radar Signals Scattered by Various Types of Hydrometeors / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // Proceedings of 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop (RMSW-2016). – К.: 2016. – С. 48-49 (Scopus).

14. Pitertsev A.A. Copula Based Dependence Measure for Polarimetric Weather Radar / Pitertsev A.A., Sinitsyn R.B., Yanovsky F.J. // International Radar Symposium (IRS-2015). – Дрезден, Німеччина: 2015. – С. 597-603 (Scopus).
15. Pitertsev A.A. Efficiency estimation for the parametric radar algorithm of detection of probable aircraft icing zones / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // MMET-2014. – Д.: 26-28 серпня 2014. – С. 243-246 (Scopus).
16. Pitertsev A.A. Polarimetric Radar as a Device for Detecting Potentially Dangerous Zones of Aircraft Icing / Pitertsev A.A., Yanovsky F. J // Proceeding IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2014). – К.: 2014. – С. 38-41 (Scopus).
17. On the Problems of Radar Detection of Zones of Possible Aircraft Icing-In-Flight / Pitertsev A.A. // Journal “Electronics and Control Systems”. К.: НАУ. – 2014. – №40. С. 98-102.
18. Pitertsev A.A. Polarimetric Method for Remote Predicting a Zone of Icing-in-Flight in Clouds and Precipitation / Pitertsev A.A., Yanovsky F. J // Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, – К.: 25-27 серпня 2011. – С. 220-223 (Scopus).
19. Pitertsev A. Radar Determination of Probable Icing-in-Flight / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proceedings Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2008). – К.: 2008. – С. 293-295 (Scopus).
20. Pitertsev A.A. Detection of Potential Aircraft Icing Zones by Remote Sensing of Meteorological Objects / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // “Telecommunications and Radio Engineering”. – Volume 65, Issue 7. – 2006. – С. 633-640 (журнал СІІА, Scopus).
21. Pitertsev A.A. Advanced Algorithm for Radar Detection of Icing. Calculation of Polarimetric Observables / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // “Telecommunications and Radio Engineering”. – Volume 66, 2007, Issue 12. – 2007. – С. 1465-1471 (журнал СІІА, Scopus).
22. Microwave scattering from particles in turbulent atmosphere and its application for hydrometeor type recognition and turbulence detection / Yanovsky F.J., Marchuk V.V., Ostrovsky Ya.P., Pitertsev A.A., Khraisat Ya.S.H., Lighthart L.P. // Вісник Інженерної академії України. – 2007. – № 3-4. – С. 16-23.

23. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // Proceedings of the 37th European Microwave Conference, 978-2-87487-001-9. – EuMA, Мюнхен, Німеччина: 2007. – C. 1550-1553 (Scopus).
24. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proceedings of the 4th European Radar Conference, 978-2-87487-004-0. – EuMA, Мюнхен, Німеччина: 2007. – C. 271-274 (Scopus).
25. Yanovsky F.J. Inverse Scattering and Radar Cross Section of Heterogeneous Hydrometeor Ensemble / Yanovsky F.J., Marchuk V.V., Ostrovsky Y.P., Pitertsev A.A., Lighthart L.P. // Proceedings 2nd European Conference on Antennas and Propagation. CD ROM: ISBN 9780863418426. – Единбург, Великобританія: 2007. – C. 1-5 (Scopus).
26. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A., Yanovsky F. // Book of Abstracts Proceedings of the 37th European Microwave Conference, EuMC-2007. – Мюнхен, Німеччина: 2007. – C. 58.
27. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A., Yanovsky F. // Book of Abstracts 4th European Radar Conference, EuRAD-2007. – Мюнхен, Німеччина: 2007. – C. 12.
28. Питерцев А.А. Обнаружение зон потенциального обледенения самолетов при радиолокационном зондировании метеорологических объектов / Х.: IPE НАН журнал «Радиофизика и электроника». – 2006. – Том 11, № 1. – С. 74-77.
29. Pitertsev A. Simulation of Microwave Backscattering on Hydrometeors / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proc. Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. – Vol.2. – Краків, Польща: 2006. – C. 499-502 (Scopus).
30. Pitertsev A.A. Identification of the Dangerous Meteorological Objects on Doppler-Polarimetric Radar Data Using the Neural Network Based Algorithm / Pitertsev A.A., Marchuk V.V., Yanovsky F.J. // Proc. IEEE Int. Radar Symposium, – Краків, Польща: 2006. – C. 225-228 (Scopus).

31. Yanovsky F.J. Neural Network Identification Algorithm for Weather Radar / Yanovsky F.J., Pitertsev A.A., Ostrovsky Y.P., Mazura I.V., Marchuk V.V. // Extended Abstracts Int. Symposium on Tropospheric Profiling ISTP7. – Боулдер, штат Колорадо, США: 11-17 червня 2006. – Paper 6.2, C. 3.
32. Yanovsky F.J. Neural Network Identification Algorithm for Weather Radar / Yanovsky F.J., Pitertsev A.A., Ostrovsky Y.P., Mazura I.V., Marchuk V.V. // Proc. Int. Symposium on Tropospheric Profiling ISTP7. – Боулдер, штат Колорадо, США: 11-17 червня 2006. – CD ROM, C. 9.
33. Lawama A. Microwave Propagation through the Mixed Ensemble of Hydrometeors: Effect of Back Scattering / Lawama A., Pitertsev A., Yanovsky F. // Book of Abstracts European Microwave Week, EuMC 2005. – Париж, Франція: 4-6 жовтня 2005. – C. 155.
34. Pitertsev A. Advanced Algorithm for Radar Detection of Icing. Calculation of Polarimetric Observables / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proceedings International Workshop on Microwaves, Radar and Remote Sensing MRRS 2005. – К.: 19-21 вересня 2005. – C. 87-90 (Scopus).
35. Lawama A. Microwave Propagation Trough Mixed Ensemble of Hydrometeors: Effect of Backscattering / Lawama A., Pitertsev A., Yanovsky F. // Proc. European Microwave Week 2005 Conference, EuMA, IEEE. – Париж, Франція: 2005. – C. 1351-1354 (Scopus).
36. Yanovsky F. Aircraft Icing Prevention Radar System: Models and Software for Calculation of Information Parameters. / Yanovsky F. Pitertsev A., Sidorenko T. // Proc. of International Radar Symposium IRS-2005. – Берлін, Німеччина: 2005. – C. 489-492 (Scopus).
37. Pitertsev A. Mathematical Modeling and Simulation of Backscattering from Hydrometeors of Different Types. / Pitertsev A., Yanovsky F. // Conference Proceedings. 10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – Д.: 14-17 вересня 2004. – C. 292-294 (Scopus).

38. ГОСТ 21508-76. Защита от обледенения самолетов и вертолетов. Термины и определения, [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-21508-76>;
39. Leifeld C. Advanced Diagnosis and Warning system for aircraft ICing Environments, / Christoph Leifeld // University of Hannover. EGS Nice: 2003, [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://flyosa.com/academics/icing.ppt>.
40. Яновський Ф.Й. «Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден», К.:НАУ, 2003. – 302 С.
41. Яковлев А.М., «Авиационная Метеорология», М.: «Транспорт», 1971, С. 133-146.
42. Трунов О. К., «Обледенение самолетов и средства борьбы с ними» М., «Машиностроение», 1965 г., 946 С.
43. Позднякова В.А., «Практическая авиационная метеорология», Учебное пособие для летного и диспетчерского состава ГА, Уральский УТЦ ГА, Екатеринбург, 2010. – 113 С.
44. SAFETY ADVISOR, SA11-11/02, [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://www.aopa.org/asf/publications/sa11.pdf>.
45. Почекаев Д. Ю. «Перечисление наиболее важных факторов при обледенении ЛА», [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: http://www.rusnauka.com/2_SND_2007/Tecnic/19111.doc.htm.
46. Vivekanandan J. “AIRCRAFT ICING DETECTION USING S-BAND POLARIZATION RADAR MEASUREMENTS” / Vivekanandan J., Brandes E. A., Stith J. L., and Keeler R. J. // Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, [електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ams.confex.com/ams/Sept2000/techprogram/paper_16467.htm.
47. Границы.ру. – Авиакатастрофа в Буффало могла произойти из-за обледенения самолета [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://graniru.org/Events/m.147554.html>.

48. Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с метеорологическими факторами, АНО «Метеоагенство Росгидромета», Москва, 2009, глава 13, [електронний ресурс]. – Режим доступу: [www/URL: http://www.aviamettelecom.ru/docs/lib2/aviaprois_part_3.pdf](http://www.aviamettelecom.ru/docs/lib2/aviaprois_part_3.pdf).
49. Заявка на отримання патенту СРСР №4898827/09 (000360) Яновським Ф.Й. Отримано позитивне рішення патентного бюро.
50. Atlas D. Radar in Meteorology / D. Atlas. – 1st edition. – Boston: American Meteorological Society, 1990. – 785 P., PP. 307-315.
51. Russchenberg H.W.J. «Ground-based remote sensing of precipitation using a multi-polarized FM-CW Doppler radar». Deft University Press, 1992. PP. 46-55.
52. Веселовская А. Б. Дистанционное зондирование снегопадов. Обзор / Радиофизика и электроника. – 2015. – Т. 6(20), № 3. – С. 38-48.
53. Веселовская А.Б. Индикатриса рассеяния снежных кристаллов / А.Б. Веселовская, Г.И. Хлопов // Радіофізика та електроніка. – 2016. – Т. 7(21), № 2.
54. Паниц В.А. Антенна с управляемой поляризацией / Паниц В.А., Шупляцкий А.Б., Яновский // Авторське свідоцтво СРСР на винахід №1645918.
55. Yanovsky F. J. «Doppler-Polarimetric Approach for Supercooled Water Detection in Clouds and Precipitation by Airborne Weather Radar», IRS 2004.
56. Yanovsky F. J. Inferring microstructure and turbulence properties in rain through observations and simulations of signal spectra measured with Doppler–polarimetric radars (pp. 501-542). Book Chapter in: Polarimetric Detection, Characterization, and Remote Sensing, Springer, 2011.
57. Bringi V.N. «Polarimetric Doppler weather radar. Principles and applications» / Bringi V.N., Chandrasekar V. // Cambridge University Press, 2001, 636 P.
58. Паниц В.А. И.М. Модернизация антенной системы бортовой РЛС «Гроза» с целью расширения ее поляризационных свойств. Звіт СКТБ ІС «Контакт» про виконану на замовлення ЦАО НДДКР / Паниц В.А., Яновский Ф.И., Браун И.М. // Договор №9065 от 27.01.1989.

59. Довиак Р. «Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения» / Довиак Р., Зрнич Д. // – М.: Гидрометеоиздат, 1988. 512 С.
60. Канарейкин Д.Б. «Поляризация радиолокационных сигналов» / Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф, Потехин / – М.: Советское радио, 1966, 440 С.
61. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – С. 344.
62. Диневич Л.А. Автоматизированный комплекс для статистических исследований микрофизических характеристик кучево-дождевых облаков / Диневич Л.А., Капитальчук И.П., Шупляцкий А.Б., Штивельман Д.К. // Тезисы межведомственного научно-технического совещания по статистическим методам и системам обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды. Минск, 1-3 ноября 1989, С. 138-139.
63. Диневич Л.А. Автоматизированный двухполяризационный комплекс для исследования характеристик кучево-дождевых облаков / Диневич Л.А., Капитальчук И.П., Шупляцкий А.Б., Штивельман Д.К. // – в сб. Активное воздействие на атмосферные процессы в Молдавии. Вип. 3, Кишинів, «Агроинформреклама», 1992.– С. 3-17.

Список публікацій здобувача за матеріалами першого розділу

64. Pitertsev A.A. Polarimetric Radar as a Device for Detecting Potentially Dangerous Zones of Aircraft Icing / Pitertsev A.A., Yanovsky F. J // Proceeding IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2014). – К.: 2014. – С. 38-41 (Scopus).
- Особистий внесок здобувача: обґрунтовано принципову можливість визначення зон потенційного обледеніння повітряних суден.*
65. On the Problems of Radar Detection of Zones of Possible Aircraft Icing-In-Flight / Pitertsev A.A. // Journal “Electronics and Control Systems”. К.: НАУ. – №40. С. 98-102.

Особистий внесок здобувача: показано основні проблеми, які виникають при виявленні зон потенційного обледеніння повітряних суден, та наведено шляхи їх вирішення.

66. Pitertsev A.A. Polarimetric Method for Remote Predicting a Zone of Icing-in-Flight in Clouds and Precipitation / Pitertsev A.A., Yanovsky F. J // Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, – К.: 25-27 серпня 2011. – С. 220-223 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: показано основні механізми утворення зон потенційного обледеніння та наведено можливі і неможливі комбінації гідрометеорів. Наведено опис методу виявлення ЗНО.

67. Pitertsev A. Radar Determination of Probable Icing-in-Flight / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proceedings Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2008). – К.: 2008. – С. 293-295 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: Показано особливості використання бортового поляриметричного радіолокатора для визначення ЗНО під час польоту.

68. Pitertsev A.A. Detection of Potential Aircraft Icing Zones by Remote Sensing of Meteorological Objects / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // “Telecommunications and Radio Engineering”. – Volume 65, Issue 7. – 2006. – С. 633-640 (журнал США, Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено основні принципи виявлення небезпечних зон з точки зору потенційного обледеніння повітряних суден під час польоту.

РОЗДІЛ 2

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАТИВНИХ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗОН НЕБЕЗПЕЧНОГО ОБЛЕДЕНИННЯ

2.1. Математичні моделі зв'язку поляризаційних параметрів із характеристиками гідрометеорів

2.1.1. Початкові дані

Для побудови математичної моделі будь-якого об'єкта або процесу необхідно визначити набір вхідних і вихідних параметрів і встановити між ними логічно і математично обґрунтовану залежність. У дисертаційній роботі розглядається інформаційна технологія визначення зон можливого обледеніння ПС за допомогою ідентифікації фазового стану гідрометеорів, які містяться в об'ємі простору по маршруту польоту ПС. Таким чином, моделюванню підлягає залежність параметрів відбитого радіолокаційного сигналу від характеристик метеорологічного об'єкта, а саме: які гідрометеори і в якій кількості (фазовий склад) наявні в хмарі. Маючи інформацію про тип частинок метеорологічного об'єкта (хмари), розташованого на трасі польоту ПС, можна зробити висновок про те, чи є цей об'єкт небезпечним, чи ні [40, 51]. Якщо хмара складається, наприклад, з переохолоджених крапель води за досить низької температури забортного повітря, то можна зробити висновок, що ця хмара є зоною можливого обледеніння і несе загрозу для ПС. Переохолоджені краплі в разі контакту з металевим корпусом ПС миттєво замерзають, покриваючи крила, фюзеляж та інші елементи конструкції ПС крижаними наростами, що має негативні наслідки [41, 42] (*підрозділ 1.1 дод. I*), і може привести до катастрофи (*підрозділ 1.5 дод. I*). Якщо ж хмара складається, наприклад, тільки з кристалів льоду і снігу, то при перетинанні неї ПС кристали відскаکують від поверхні ПС, не створюючи будь-якого істотного ефекту впливу.

Параметри відбитого від метеорологічного об'єкта сигналу залежать від фізичних та статистичних характеристик сукупності гідрометеорів, що входять до складу метеооб'єкта. Отже, можна ідентифікувати тип гідрометеорів у складі метеорологічного об'єкта, використовуючи деякі параметри відбитого від нього

радіолокаційного сигналу [51]. Основна мета цього розділу дисертаційної роботи – показати, що значення деяких поляриметричних величин будуть відрізнятися при відбитті від різних типів гідрометеорів, таких, як

- *переохолоджені краплі в хмарі,*
- *краплі дощу,*
- *крижані кристали різних типів,*
- *обводнені кристали (у стадії танення).*

2.1.2. Радіолокаційна відбиваність

Якщо діаметр D опроміненої частинки значно менший ніж довжина хвилі λ радіолокатора, то частинку можна вважати релеївським розсіювачем, і її ефективна площа зворотного розсіювання (ЕПР) σ може бути оцінена за допомогою формули:

$$\sigma \approx (\pi^5 / \lambda^4) |K|^2 D^6, \quad (2.1)$$

де K – комплексний коефіцієнт заломлення речовини частинки [3, 40]. Величина $|K|^2$ для води дорівнює близько 0,93, а для льоду – 0,19 [51]. Для несферичних частинок використовують здебільшого поняття еквівалентного діаметра, тобто діаметр рівновеликої сфери (об'єм якої дорівнює об'єму реальної несферичної частинки).

Оскільки в об'ємі відбиття міститься велика кількість релеївських частинок різного розміру, то питома ЕПР на одиницю об'єму σ_0 на дальності R визначається як [40]:

$$\sigma_0 = (\pi^5 / \lambda^4) |K|^2 Z, \quad (2.2)$$

де величина Z , так звана радіолокаційна відбиваність (РВ), для об'єму, що відбиває сигнал і знаходиться на дальності R , визначається виразом [40]:

$$Z(R) = \int_0^{\infty} N(D, R) D^6 dD, \quad (2.3)$$

де N – кількість розсіювачів у досліджуваному об'ємі простору.

Із виразу (2.3) видно, що величина РВ Z є шостим початковим моментом розподілу крапель за розмірами і повністю визначається мікроструктурою самого метеорологічного утворення. Об'єднавши всі технічні характеристики РЛС, що входять в рівняння радіолокації [40], єдиним параметром C , який має значення енергетичного потенціалу даного радіолокатора, середню прийняту потужність при відбитті від метеооб'єкта з РВ Z можна записати у вигляді

$$\bar{P}_{np} \approx \frac{C \cdot Z}{R^2} |K|^2, \quad (2.4)$$

де $C = \text{const}$ – енергетична стала МНРЛС, що залежить від тривалості випромінюваного імпульсу, коефіцієнта підсилення антени, потужності передавача, робочої довжини хвилі МНРЛС, сумарних втрат у трактах радіолокаційної станції, а також коефіцієнта заповнення¹.

Формула (2.3) показує, що РВ дуже залежить від діаметра розсіювачів (шостий ступінь). Відбиваність РВ має розмірність одиниці довжини в кубі, але її розмірність вимірюють в $[\text{мм}^6/\text{м}^3]$, зберігаючи розмірноті діаметра крапель в міліметрах і об'єму розсіювання в метрах кубічних. Діапазон значень РВ, що трапляється в хмарах і опадах, дуже великий, тому його зручно подавати в логарифмічних одиницях – дібизетах (dBZ), причому $1dBZ = 10 \cdot \lg Z$, де Z виражено в $[\text{мм}^6/\text{м}^3]$ [50].

На відміну від питомої ЕПР σ_0 за формулою (2.2), величина РВ є характеристикою тільки самого метеорологічного об'єкта. Із виразу (2.4) випливає, що вимірюючи потужність сигналу на вході приймача \bar{P}_{np} , можна оцінювати РВ метеорологічного об'єкта.

¹ коефіцієнт заповнення – величина, обернена шпаруватості сигналу.

2.1.3. Матриця зворотного розсіювання

Поляризаційні характеристики окремого гідрометеора описуються за допомогою матриці зворотного розсіювання $[S]$, яка пов'язує електричне поле зворотного розсіювання $[E]^b$ в антені з падаючим електричним полем $[E]^i$ в такий спосіб [40, 60]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{bmatrix}^b = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{bmatrix}^i \frac{\exp(-jk\mathbf{r})}{\mathbf{r}}, \quad (2.5)$$

де $j=(-1)^{1/2}$, а індекси 1 і 2 позначають дві ортогональні поляризації, наприклад, лінійну вертикальну і лінійну горизонтальну або кругову правого обертання і кругову лівого обертання, $k = 2\pi / \lambda$, де k – хвильове число. Перший індекс елемента матриці розсіювання належить до поляризації зворотного розсіювання, а другий індекс – до поляризації падаючого електричного поля. У взаємозворотному середовищі, яким є сукупність гідрометеорів, $s_{12} = s_{21}$. Ортогональні поля з круговою поляризацією можуть бути виражені в термінах ортогональних лінійно поляризованих полів через перетворення [40]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_r \\ \mathbf{E}_l \end{bmatrix}^i = [\mathbf{G}] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{E}_h \\ \mathbf{E}_v \end{bmatrix}^i, \quad (2.6)$$

у якому матриця

$$[\mathbf{G}] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} j & 1 \\ -j & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

а індекси r, l позначають праву і ліву кругові поляризації; h, v – горизонтальну і вертикальну лінійні поляризації. Аналогічні співвідношення можна записати і для полів зворотного розсіювання, але тоді необхідно використовувати матрицю, спряжену стосовно $[\mathbf{G}]$, оскільки при відбитті від гідрометеорів хвиля кругової

поляризації змінюює напрямок обертання на протилежне хвилі передавача [40]. Отже, формула (2.6) набуває вид

$$[\mathbf{E}_c]^b = [\mathbf{G}^*] \cdot [\mathbf{E}_+]^b, \quad (2.8)$$

де індекси c і $+$ означають ортогональні пари з круговою і лінійною поляризацією відповідно. Існує наступне співвідношення між матрицями розсіяння для лінійної і кругової поляризацій [40]

$$[\mathbf{S}_c] = [\mathbf{G}^*] \cdot [\mathbf{S}] \cdot [\mathbf{G}^*]^{-1}, \quad (2.9)$$

тому індивідуальні елементи матриці $[\mathbf{S}]$ з формули (2.9) будуть пов'язані між собою співвідношеннями [40]:

$$\begin{aligned} s_{rr} &= (s_{vv} - s_{hh} - j2s_{vh})/2 \\ s_{ll} &= (s_{vv} - s_{hh} + j2s_{vh})/2 . \\ s_{lr} &= s_{rl} = (s_{vv} + s_{hh})/2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Таким чином, можна переходити від одного ортогонального поляризаційного базису до іншого. У дисертаційній роботі в основному буде розглядатися лінійний поляризаційний базис, але результати можуть бути застосовані і для будь-якого іншого ортогонального поляризаційного базису. Для простоти аналізу ефекти поширення радіохвиль в атмосфері не враховуються. Згідно з працею [51], розглянемо лінійно поляризоване електричне поле зворотного розсіювання від деякого гідрометеора на відстані r_n [40]:

$$E_{ij} = \frac{P_j^{1/2} G_A^{1/2} F(\theta, \psi) \eta_0^{1/2} s_{ij}(n)}{2\sqrt{\pi} \cdot r_n} \exp(-j2kr_n), \quad (2.11)$$

де s_{ij} – елемент матриці зворотного розсіювання (2.5) для n -го гідрометеора; k – хвильове число; P_j – потужність передавача; G_A – коефіцієнт підсилення антени (у разі поширення хвилі в одному напрямку); $F(\theta, \psi)$ – нормована форма ДН антени; $\eta_0 = 377$ Ом – повний опір вільного простору, а E_{ij} – прийняте поле. Величина падаючого на окрему частинку поля подається формулою $P_j^{1/2}G_A^{1/2}F(\theta, \psi)\eta_0^{1/2}/2\sqrt{\pi}r_n$ так, щоб задовольнялась умова зв'язку коефіцієнтів розсіювання s_{ij} у формулі (2.11) з ефективною площею зворотного розсіювання σ_t відповідно до співвідношення [40]

$$|s_{hh}|^2 = \frac{\sigma_t}{4\pi}. \quad (2.12)$$

Напруга сигналу u_{ij} на виході приймача метеорологічного радіолокатора буде оброблятись з метою визначення властивостей гідрометеорів. Напруга u_{ij} для n -го гідрометеора пропорційна коефіцієнту розсіювання і може бути записана як [40]

$$u_{ij}(r_n) = s_{ij}(n)F(r_n) \exp(-j2kr_n). \quad (2.13)$$

Коефіцієнт пропорційності $F(r_n)$ включає в себе залежність від дальності, ослаблення, вагової функції та інших параметрів обраної математичної моделі [59]. Напруга U_{ij} для сукупності частинок, що розсіюють поле, є суперпозицією напруг від кожного індивідуального розсіювача:

$$U_{ij} = \sum_n s_{ij}(n) \cdot \exp(-j2kr_n) \cdot F(r_n). \quad (2.14)$$

Середнє значення U_{ij} дорівнює нулю через внесок фазових членів у результат підсумування. Тому як характеристики поляризованих сигналів зазвичай використовують різні моменти другого порядку $\langle U_{ij}U_{kl}^* \rangle$ і пов'язують їх з

властивостями розсіювачів (кутові дужки означають математичне сподівання, а зірочка – комплексно спряжену величину). Виходячи з виразу (2.14) отримаємо [40, 51]

$$\langle U_{ij} U_{kl}^* \rangle = \sum_n \left\langle \left[s_{ij}(n) s_{kl}^*(n) \right] \right\rangle |F(\mathbf{r}_n)|^2 = \left\langle s_{ij} s_{kl}^* \right\rangle \int |F(\mathbf{r}_n)|^2 dV. \quad (2.15)$$

У рівності (2.15) підсумовування за n замінено інтегралом вагової функції за об'ємом, що відбиває сигнал, і припускається, що розсіювачі в об'ємі розподілені однорідно. У загальному випадку моменти другого порядку (2.15) можуть бути згруповани в коваріаційну матрицю 4×4 , проте завдяки взаємності член $\langle U_{ij} = U_{ji} \rangle$, тому коваріаційна матриця зводиться до розмірності 3×3 . Із рівняння (2.15) видно, що коваріаційна матриця напруга помноженою на скаляр коваріаційною матрицею зворотного розсіювання, яку можна подати таким чином [40, 51]:

$$\begin{matrix} \left\langle |s_{hh}|^2 \right\rangle & \left\langle s_{hv} s_{hh}^* \right\rangle & \left\langle s_{vv} s_{hh}^* \right\rangle \\ \left\langle s_{hh} s_{hv}^* \right\rangle & \left\langle |s_{hv}|^2 \right\rangle & \left\langle s_{vv} s_{hv}^* \right\rangle \\ \left\langle s_{hh} s_{vv}^* \right\rangle & \left\langle s_{hv} s_{vv}^* \right\rangle & \left\langle |s_{vv}|^2 \right\rangle \end{matrix}. \quad (2.16)$$

Користуючись цією коваріаційною матрицею, можна ввести деякий набір поляризаційних параметрів радіолокаційного сигналу, які можуть бути виміряні, і пов'язати ці параметри із величинами, що спостерігаються, та властивостями розсіювачів.

2.1.4. Поляриметричні вимірювані параметри

Поляриметричні вимірювані параметри, або змінні – це ненадлишкові характеристики зворотного розсіювання, які залежать від поляризації. Значення поляриметричних параметрів відбитого сигналу можна обчислити, знаючи розрахункові значення потужності відбитого сигналу на різних поляризаціях при

заданої потужності та поляризації випромінюваного сигналу [51, 64]. Для визначення потужності прийнятого сигналу на горизонтальній і вертикальній поляризаціях за заданих характеристик цілі (метеорологічного об'єкта), очевидно, необхідно вміти визначати ефективну поверхню розсіювання на різних поляризаціях від окремих гідрометеорів і деякої області простору, заповненої масивом таких гідрометеорів. Тобто необхідно пов'язати фізичні параметри гідрометеорів і параметри потужності відбитого сигналу [65]. Тоді математичні сподівання (2.16) можна виразити у термінах розподілів властивостей гідрометеорів, таких як еквівалентний діаметр, форма, кут нахилу і ін. Тому в загальному вигляді можна записати [40, 51]:

$$\left\langle s_{ij} s_{kl}^* \right\rangle = \int N(\mathbf{X}) s_{ij} s_{kl}^* d\mathbf{X}, \quad (2.17)$$

де $N(X)$ – щільність розподілу ймовірності (ЩРЙ) властивостей розсіювача; s_{ij} – елементи матриці зворотного розсіювання (2.5), які подані вектором X .

Недіагональні симетричні елементи коваріаційної матриці (2.16) пов'язані між собою. Фактично є дев'ять дійсних величин (три – на головній діагоналі і шість недіагональних елементів, що залишилися), які можуть бути виміряні за допомогою ПР.

Більшість елементів коваріаційної матриці зворотного розсіювання можна використовувати самостійно або в комбінації з іншими елементами, щоб отримувати інформацію про властивості гідрометеорів. Характерними ознаками, що описують властивості сукупності гідрометеорів, є параметри розподілу частинок за розмірами, терmodинамічний стан гідрометеорів, форма, просторова орієнтація й інші. Передбачається, що досить багато параметрів, що характеризують властивості гідрометеорів, можна оцінити з дев'яти вимірюваних величин [57]. Це дійсно так у деяких окремих випадках, наприклад, при зондуванні чистого дощу [66]. Але гідрометеори часто являють собою різномірну суміш, не завжди мають чітко визначену форму і їх поляриметричні сигнатури можуть виявитися досить невизначеними. Більш того, зв'язки між параметрами розсіювачів і вимірюваними

величинами є нелінійними, і, крім того, приховані під інтегралами математичних сподівань (як у формулі 2.17). Тому дослідники [40, 51, 57, 59] використовують комбінації вимірюваних величин, щоб виключити деякі характеристики властивостей гідрометеорів і виділити інші.

Основні поляриметричні вимірювані змінні, які отримані з розглянутих параметрів коваріаційної матриці зворотного розсіювання, наведені нижче [40, 51]:

1. Радіолокаційна відбиваність (РВ) при горизонтальній поляризації

$$Z_H = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \left\langle |S_{hh}|^2 \right\rangle, \quad (2.18)$$

де $|K|^2$ – те саме, що у формулі (2.1).

2. РВ при вертикальній поляризації

$$Z_V = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \left\langle |S_{vv}|^2 \right\rangle. \quad (2.19)$$

3. Диференціальна відбиваність

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{|S_{hh}|^2}{|S_{vv}|^2}. \quad (2.20)$$

4. Лінійне деполяризаційне відношення

$$LDR_{hv} = 10 \log \frac{|S_{hv}|^2}{|S_{vv}|^2}, \quad (2.21)$$

$$\text{або } \text{LDR}_{vh} = 10 \log \frac{|S_{vh}|^2}{|S_{vv}|^2}. \quad (2.22)$$

5. Кореляційний коефіцієнт при нульовому зсуві

$$\rho_{hv}(0) = \frac{\langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle}{\langle |S_{hh}|^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \langle |S_{vv}|^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}. \quad (2.23)$$

Крім цих п'яти вимірюваних параметрів можуть бути використані й інші поляризаційні характеристики, наприклад, диференціальна фаза, що являє собою різницю фаз відбитих сигналів на ортогональних поляризаціях

$$\Phi_{DP} = \Phi_H - \Phi_V, \quad (2.24)$$

де Φ_H – фаза відбитого сигналу при горизонтальній, а Φ_V – при вертикальній поляризаціях. Оскільки різниця фаз залежить від дальності, на якій знаходяться розсіювачі, то як ПІ використовують питому диференціальну фазу

$$K_{DP} = \frac{\Phi_{DP}(R_1) - \Phi_{DP}(R_2)}{2(R_2 - R_1)}, \quad (2.25)$$

де R_1 і R_2 – дальності до двох об'ємів ($R_1 < R_2$) [40, 51].

2.2. Поляриметричний підхід до розрахунку параметрів радіолокаційного сигналу, що відбивається від еліпсоїда

2.2.1. Основні параметри і визначення

Розглянемо докладніше такі поляриметричні параметри, як диференціальна відбиваність (ДВ або Z_{DR} – *Differential Reflectivity*), лінійне деполяризаційне

відношення (ЛДВ і, відповідно, LDR – *Linear Depolarization Ratio*) і коефіцієнт кореляції при нульовому зсуві (КК, *Correlation Factor*) [57]. Ці параметри зручно розраховувати за допомогою математичного моделювання відбиття радіолокаційного сигналу від метеооб'єкта, оскільки вони являють собою відношення, або дроби, формули (2.20–2.23). Під час розрахунку абсолютних значень, наприклад, радіолокаційної відбиваності, фазового зсуву тощо, є ймовірність виникнення розбіжностей в одному або декількох розрахункових параметрах з реальними значеннями. А під час розрахунку відносної величини допущені розбіжності розрахункових параметрів з реальними характеристиками метеооб'єкта в чисельнику і знаменнику дробу можуть взаємно компенсуватися і не справляти істотного впливу на результат.

У роботі використовується підхід до розрахунку ЕПР гідрометеорів відповідно до формул Релея (формули (2.1), (2.2)). Такий підхід припустимо застосовувати (тобто він дає задовільну точність розрахунку) тільки в тому випадку, коли довжина хвилі значно більша від розміру цілі. Згідно з експериментальними даними [40, 50], [59], найбільший розмір крапель дощу становить близько 7...8 мм, розміри кристалів льоду зазвичай не перевищують [50, 59] 10...12 мм. Отже, розрахункова довжина хвилі радіолокатора для сканування масиву гідрометеорів має становити кілька сантиметрів для дотримання умов релейського розсіювання.

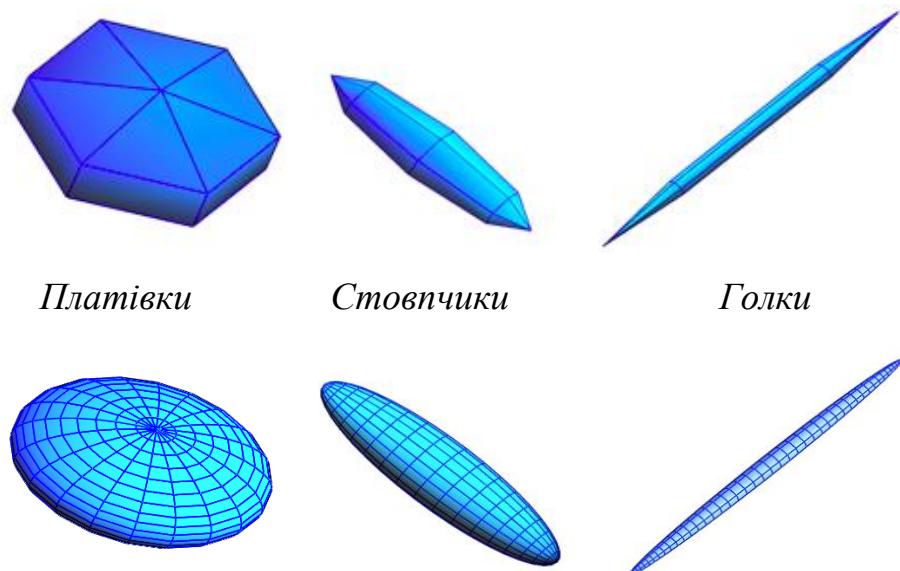


Рис. 2.1. Спрощене уявлення гідрометеорів у вигляді сфероїдів обертання

Оскільки для роботи бортових метеорологічних радіолокаторів виділений конкретний діапазон частот, для розрахунків береться довжина хвилі $\lambda = 3,2$ см, що використовується на практиці для існуючих метеорологічних локаторів. Реальна форма різних частинок за такого підходу підміняється еліпсоїдами з різним співвідношенням між осями (рис. 2.1). Як вхідні параметри, очевидно, доцільно поставити конкретні фізичні параметри метеорологічного об'єкта:

- *мінімальний і максимальний розміри частинок;*
- *залежність товщини від діаметра або діаметра від довжини;*
- *розподіл концентрації частинок (кількості) за розмірами;*
- *залежність концентрації від температури;*
- *просторова орієнтація розсіювачів;*
- *положення і орієнтація в просторі спостерігача.*

Спираючись на зроблені визначення і введені поляриметричні параметри, розглянемо фізичні принципи поляриметричного підходу до зондування метеорологічних об'єктів. Мікроструктура метеорологічних об'єктів визначається розміром, формою, типом гідрометеорів, швидкістю їх падіння, орієнтацією. Більшість типів опадів містять несферичні частинки. Відомо, що краплі дощу мають сплюснуту сфероїдну форму (рис. 2.2) [40].



Рис. 2.2. Типові форми падаючих крапель дощу, що падають з постійною швидкістю (за Pruppacher and Beard, 1970) [66]

Кристали льоду можуть бути витягнутими або сплюсненими, сніжинки мають більш складну форму (рис 2.3) [68, 69, 70].

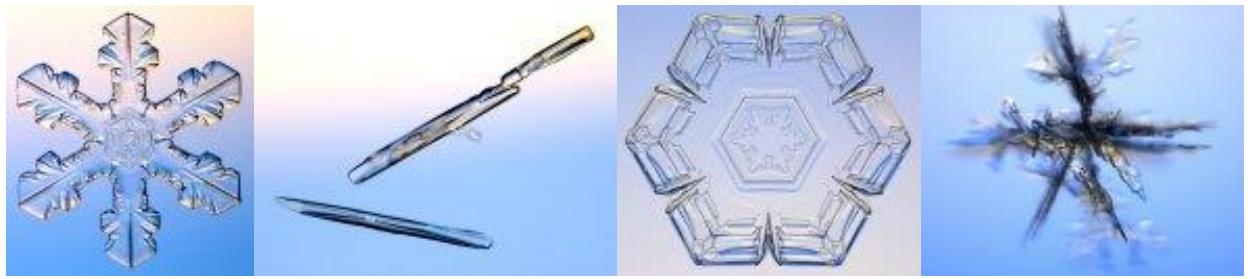


Рис. 2.3. Фотографії штучно вирощених сніжинок під мікроскопом [67]

Для того щоб врахувати несферичність гідрометеорів, як моделі їх форм використовують сплюснуті або витягнуті еліпсоїди з певним співвідношенням між півосяями a_1, a_2, a_3 (рис. 2.4) [51, 57].

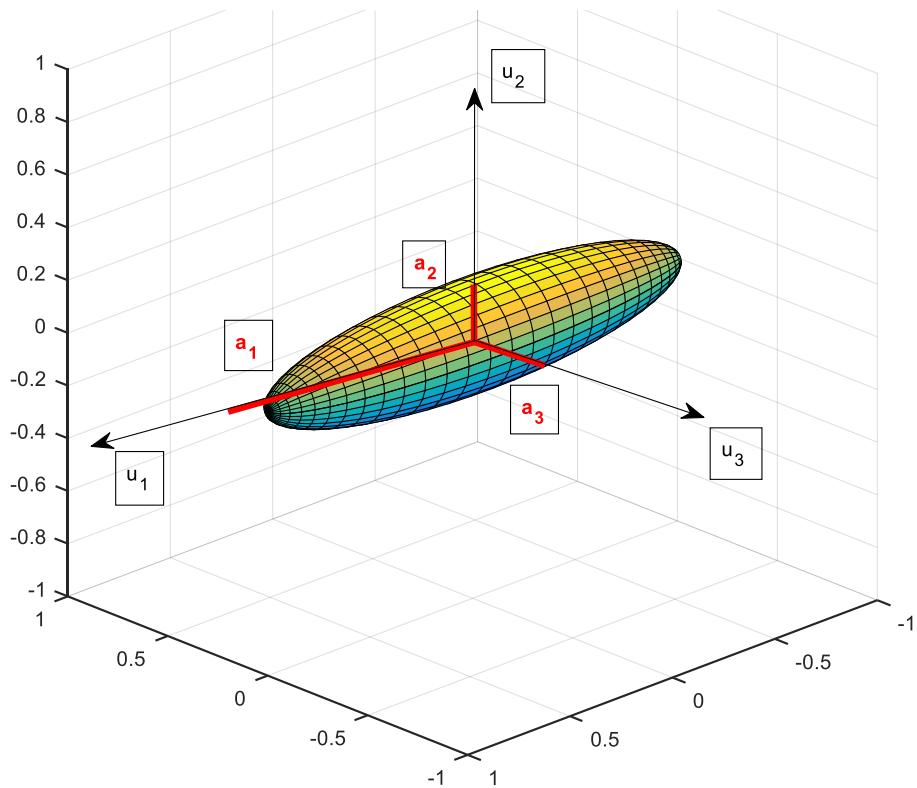


Рис. 2.4. Спрощене уявлення гідрометеорів для математичних розрахунків [51]

Оси u_1, u_2, u_3 – координатні осі системи координат, прив'язаної до частинки (а не до зовнішнього спостерігача). Тут і далі для наочності будуть показані відносні розміри еліпсоїдів з максимальним розміром півосі що дорівнює одиниці, без прив'язки до реальних фізичних розмірів. Детальний опис розрахунку параметрів сигналу, відбитого від такого роду еліпсоїдів наведено нижче.

2.2.2. Варіант з вертикальною орієнтацією головної осі еліпсоїда (без нахилу)

Розглянемо найпростіший випадок, коли гідрометеор перебуває у положенні без нахилу, як показано на векторній діаграмі розсіювання на несферичній частинці (сфераїді), представленої на рис. 2.5.:

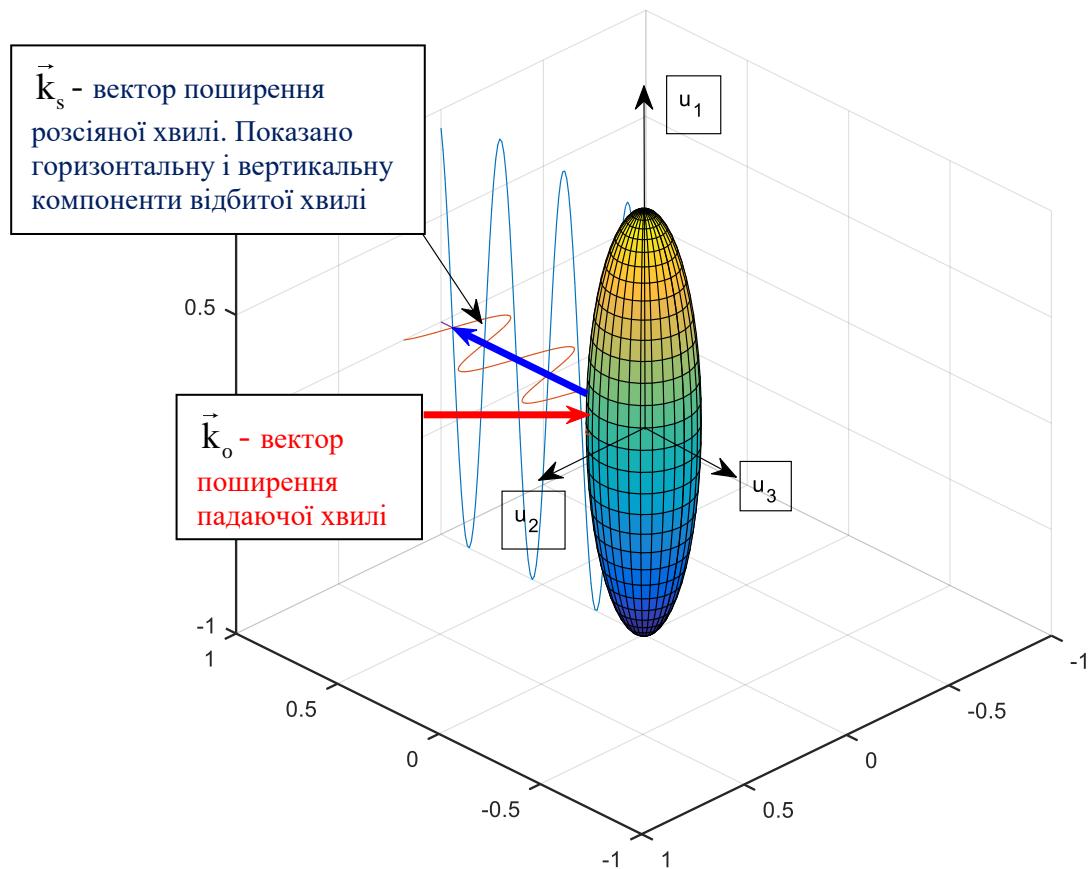


Рис. 2.5. Схема опромінення гідрометеора. Випадок без нахилу головної осі

Коли електричне поле впливає на малу однорідну частинку, вона збуджується під дією зовнішнього опромінювання, і поводить себе як електричний диполь. Дипольний момент \vec{p} залежить від напруженості падаючого поля \vec{E}_i через тензор поляризованості $\vec{\gamma}$ [51]:

$$\vec{p} = \vec{\gamma} \cdot \vec{E}_i, \quad (2.26)$$

$$\vec{\gamma} = V \epsilon_o (\epsilon_r - 1) \vec{\tau}, \quad (2.27)$$

де V – об'єм частинки, ε_r – відносна діелектрична проникність частинки; $\vec{\tau}$ – тензор форми, який виражає вплив форми частинки і геометрії на процес зворотного розсіювання.

Якщо осі сфераїда збігаються з основною координатною системою, тобто частинка не нахиlena, то тензор форми являє собою таку матрицю:

$$\vec{\tau} = \sum \Lambda_i \vec{u}_i \vec{u}_i = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_3 \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Елементи цієї матриці Λ_i є електромагнітними коефіцієнтами форми частинки. Вони пов'язані із властивостями сфераїда:

$$\Lambda_i = \frac{1}{1 + \lambda_i (\varepsilon_r - 1)}, \quad (2.29)$$

де λ_i – коефіцієнти, які визначаються тільки геометрією, тобто формою сфераїда:

$$\lambda_i = \frac{1}{2} a_1 a_2 a_3 \int_0^\infty dt \frac{1}{(1 + a_i^2) \sqrt{(t + a_1^2)(t + a_2^2)(t + a_3^2)}}. \quad (2.30)$$

Для коефіцієнтів λ_i справедлива умова:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1. \quad (2.31)$$

Величини a_i у формулі (2.30) є радіусами основних осей сфераїда (рис. 2.4).

Для сфераїдів обертання дві осі рівні між собою: $a_1 = a_2$. При цьому

$\lambda_3 = 1 - 2\lambda_1 = 1 - 2\lambda_2$, і $\Lambda_1 = \Lambda_2$. Інтеграл (2.30) можна розв'язати аналітично [51] і подати його у вигляді функції відношення нерівних осей сфeroїда $\rho = \frac{1}{\xi} = \frac{a_1}{a_3}$:

$$\lambda_3 = f(\rho). \quad (2.32)$$

Знаючи λ_i , якщо $i = 1, 2, 3$ і діелектричну проникність, можна розрахувати елементи тензора (2.28) для сфeroїдів різної форми. У табл. 2.1 представлена результати розрахунків λ_i і Λ_i для деяких окремих випадків.

Напруженість розсіяного поля \vec{E}_s визначається рівнянням:

$$\vec{E}_s = \frac{k_o}{4\pi\epsilon_o r} \left(\vec{p} - (\vec{p} \cdot \vec{k}_s) \vec{k}_s \right) e^{-jk_o r}, \quad (2.33)$$

де k_o – хвильове число; ϵ_o – діелектрична проникність вакууму; r – дальність до об'єму розсіювання; \vec{k}_s – вектор поширення розсіяної хвилі. Передбачається, що дипольний момент \vec{p} миттєво утворюється під впливом напруженості падаючого поля \vec{E}_i . Тому його напрямок є перпендикулярним до вектора падаючої хвилі \vec{k}_o .

Таблиця 2.1

Геометричні λ і електромагнітні Λ параметри форми для деяких граничних моделей частинок у вигляді сфeroїдів [51]

Форма частинки	λ_1	λ_2	λ_3	Λ_1	Λ_2	Λ_3
голки ($a_3 \rightarrow \infty$)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{2}{\epsilon_r + 1}$	$\frac{2}{\epsilon_r + 1}$	1
пластини ($a_3 \rightarrow 0$)	0	0	1	$1 + 1$	$\frac{1}{\epsilon_r}$	
сфери ($a_1 = a_3$)	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{\epsilon_r + 2}$	$\frac{3}{\epsilon_r + 2}$	$\frac{3}{\epsilon_r + 2}$

У разі зворотного розсіювання $\vec{k}_s = -\vec{k}_o$ напруженість поля зворотного розсіювання визначається з виразу (2.33) підставленим $\vec{k}_s = -\vec{k}_o$:

$$\vec{E}_s = \frac{k_o^2}{4\pi\varepsilon_0 r} \vec{p} e^{-jk_o r}. \quad (2.34)$$

За припущення, що осі частинки збігаються з осями основної системи координат (тобто частинка не нахилена), вираз (2.34) можна переписати з урахуванням (2.26) і (2.27) у наступному вигляді

$$\vec{E}_s = \frac{k_o^2}{4\pi\varepsilon_0 r} V(\varepsilon_r - 1) \vec{\tau} \vec{E}_i e^{-jk_o r} = \frac{k_o^2}{4\pi r} V(\varepsilon_r - 1) \vec{\tau} \vec{e}_i |\vec{E}_i| e^{-jk_o r} \quad (2.35)$$

Для того щоб розрахувати комплексну напругу сигналу U_r , необхідно врахувати вектор поляризації приймальної антени \vec{e}_r :

$$U_r = \vec{e}_r \cdot \vec{E}_s = \frac{k_o^2}{4\pi r_t} V(\varepsilon_r - 1) |\vec{E}_i| |\vec{e}_r| \vec{e}_r \cdot \vec{\tau} \vec{e}_i e^{-jk_o r_t}, \quad (2.36)$$

де r_t означає повну відстань, яку пройшла електромагнітна хвиля. Щільність потоку потужності Π пропорційна $\frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{E}^* = \frac{1}{2} |U_r|^2$. Формально визначена ЕПР дорівнює [51]:

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{\Pi_r}{\Pi_i}, \quad (2.37)$$

де Π_r – щільність потоку потужності падаючої хвилі; а Π_i – щільність потоку потужності відбитої хвилі. Тоді ЕПР сфера-їда можна записати у вигляді

$$\sigma_{ri} = \frac{k_o^4}{4\pi} V^2 (\varepsilon_r - 1)^2 \left| \vec{e}_r \vec{\tau} \vec{e}_i \right|^2 = \frac{k_o^4}{4\pi} V^2 (\varepsilon_r - 1)^2 q_{ri}. \quad (2.38)$$

У разі зворотного розсіювання на сфері $\vec{\tau}$ зводиться до $\Lambda \sum_i^3 \vec{u}_i \vec{u}_i$, де $\Lambda = 3/\varepsilon_r + 2$.

При $\vec{\varepsilon}_i = \vec{\varepsilon}_r$ можна отримати наступну оцінку ЕПР:

$$\sigma = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{(\varepsilon_r - 1)}{(\varepsilon_r + 2)} \right|^2. \quad (2.39)$$

Вираз (2.39) збігається з виразом, що використовувався для релєївського розсіювання на сферичній частинки (2.1).

Розглянемо чотири ситуації формування поляризаційних сигналів:

- 1) випромінювання імпульсів горизонтально поляризованих ЕМ коливань і приймання тільки горизонтально поляризованої складової відбитого сигналу: $\vec{e}_r = \vec{e}_i = \vec{e}_h$;
- 2) випромінювання імпульсів вертикально поляризованих ЕМ коливань і приймання тільки вертикально поляризованої складової відбитого сигналу: $\vec{e}_r = \vec{e}_i = \vec{e}_v$;
- 3) випромінювання імпульсів горизонтально поляризованих ЕМ коливань і приймання тільки вертикально поляризованої складової відбитого сигналу: $\vec{e}_r = \vec{e}_v \cap \vec{e}_i = \vec{e}_h$;
- 4) випромінювання імпульсів вертикально поляризованих ЕМ коливань і приймання тільки горизонтально поляризованої складової відбитого сигналу: $\vec{e}_r = \vec{e}_h \cap \vec{e}_i = \vec{e}_v$.

Перша і друга ситуації відповідають вимірам на основній поляризації, а третя і четверта ситуації – перехресним вимірам. Тут, як і вище, індекси *i* (*incident*) та *r* (*received*) належать відповідно до вектора падаючої і прийнятої хвиль [51].

Однічні вектори горизонтальної і вертикальної поляризації \vec{e}_h і \vec{e}_v можна записати як

$$\vec{e}_h = -\vec{x}_1 \sin \theta \sin \varphi + \vec{x}_2 \cos \varphi - \vec{x}_3 \cos \theta \sin \varphi; \quad (2.40)$$

$$\vec{e}_v = \vec{x}_1 \sin \theta \cos \varphi + \vec{x}_2 \sin \varphi + \vec{x}_3 \cos \theta \cos \varphi. \quad (2.41)$$

ЕПР частинок при горизонтальній і вертикальній поляризаціях σ_{hh} і σ_{vv} визначаються якщо $\vec{e}_r = \vec{e}_i = \vec{e}_h$ і $\vec{e}_r = \vec{e}_i = \vec{e}_v$ відповідно, а ЕПР на перехресній поляризації σ_{hv} – при $\vec{e}_r = \vec{e}_h$ і $\vec{e}_i = \vec{e}_v$. Їх можна записати у вигляді

$$\sigma_{hh} = \frac{k_o^4}{4\pi} V^2 |\epsilon_r - 1|^2 q_{hh} = \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\epsilon_r - 1|^2 q_{hh}; \quad (2.42)$$

$$\sigma_{vv} = \frac{k_o^4}{4\pi} V^2 |\epsilon_r - 1|^2 q_{vv} = \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\epsilon_r - 1|^2 q_{vv}; \quad (2.43)$$

$$\sigma_{hv} = \frac{k_o^4}{4\pi} V^2 |\epsilon_r - 1|^2 q_{hv} = \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\epsilon_r - 1|^2 q_{hv}, \quad (2.44)$$

де D_e – еквівалентний діаметр частинки; q_{hh} , q_{vv} і q_{hv} – параметри, які враховують форму і орієнтацію частинки. Для вертикально орієнтованого сфероїда (рис. 2.5) вони становлять:

$$q_{hh} = [(\Lambda_3 - \Lambda_1) \cos^2 \theta \sin^2 \varphi + \Lambda_1]^2; \quad (2.45)$$

$$q_{vv} = [(\Lambda_3 - \Lambda_1) \cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \Lambda_1]^2; \quad (2.46)$$

$$q_{vh} = [0,5 \sin 2\varphi \cos^2 \theta (\Lambda_3 - \Lambda_1)]^2. \quad (2.47)$$

Коли $\varphi = 0$ або $\varphi = \pi/2$, перехресної компоненти немає ($q_{vh} = 0$) незалежно від кута місця θ .

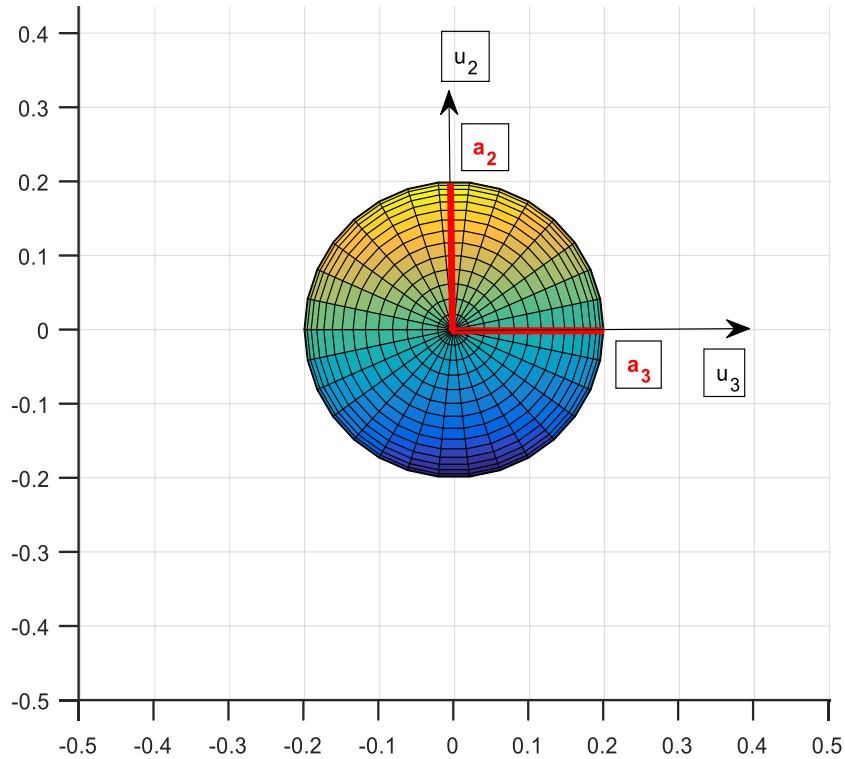


Рис. 2.6. Вигляд еліпсоїда при скануванні локатором зверху
($\varphi = 0$ або $\varphi = \pi/2$)

Горизонтальна і вертикальна компоненти відбитого сигналу однакові за амплітудою, кросполіаризаційної складової немає.

Із формул (2.45) і (2.46) випливає, що коли $\theta = \pi/2$ (промінь направлений вертикально), $q_{hh} = q_{vv} = \Lambda_1^2$, а $q_{vh} = q_{hv} = 0$, тобто поляриметричний радіолокатор не буде спостерігати ніяких поляризаційних кореляцій. Фізично це пояснюється тим, що проекція сфероїда на площину, утворену векторами \vec{e}_h і \vec{e}_v , являє собою коло при вертикальному зондуванні нормально орієнтованого сфероїда (рис. 2.6). При горизонтальному зондуванні $\theta = 0$, і проекцією сфероїда є еліпс, тому $q_{hh} \neq q_{vv}$ (і різниця тим більша, чим більша сплюснутість сфероїда), а $q_{vh} \neq 0$, якщо кут поляризації випромінюваних коливань φ не дорівнює 0 або $\pi/2$.

2.2.3. Похила орієнтація головної осі еліпсоїда (загальний випадок)

Перейдемо до розгляду більш загальної ситуації з нахиленою відносно спостерігача частинкою (рис. 2.7). Розрахунок поляриметричних складових відбитого сигналу в такому випадку значно ускладняється.

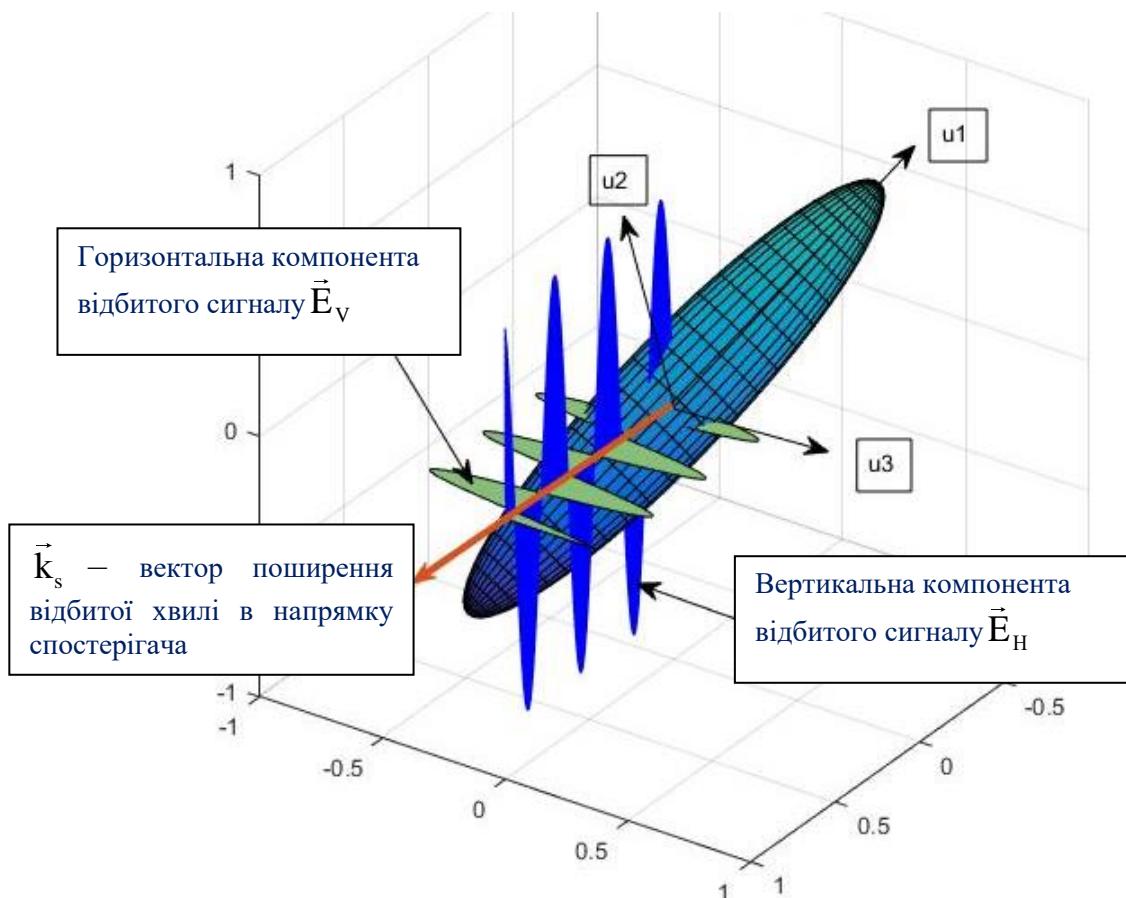


Рис. 2.7. Відбитий сигнал за похилого положення еліпсоїда щодо стороннього спостерігача

Визначимо ряд параметрів радіолокатора і цілі, які будуть використані для побудови математичної моделі відображення сигналів від метеорологічного об'єкта. Ці параметри включають в себе координати окремої частинки в сферичній системі координат відносно початкового положення:

- α – кут повороту частинки в горизонтальній площині;
- δ – кут повороту частинки в вертикальній площині;
- φ – кут повороту частинки у фронтальній площині, або кут поляризації;
- θ – кут нахилу радіолокатора до площини горизонту.

Система координат при цьому прив'язана до частинки, а не до спостерігача.

Формули (2.45), (2.46) і (2.47) тепер набувають відповідно вигляду:

$$q_{hh} = [\Lambda_1 + (\Lambda_3 - \Lambda_1) \cdot \Phi_{hh}]^2; \quad (2.48)$$

$$q_{vv} = [\Lambda_1 + (\Lambda_3 - \Lambda_1) \cdot \Phi_{vv}]^2; \quad (2.49)$$

$$q_{hv} = [(\Lambda_3 - \Lambda_1) \cdot \Phi_{hv}]^2. \quad (2.50)$$

Коефіцієнти Φ_{hh} , Φ_{vv} і Φ_{hv} , що відповідають за тригонометричні перетворення, можна розрахувати за такими формулами [51]:

$$\begin{aligned} \Phi_{hh} = & \sin^2 \delta \cos^2 \alpha \sin^2 \varphi \sin^2 \theta + \sin^2 \delta \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi + \cos^2 \delta \sin^2 \varphi \cos^2 \theta - \\ & - \frac{1}{2} \sin 2\delta \cos \alpha \sin^2 \varphi \sin 2\theta - \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \alpha \sin 2\varphi \cos \theta + \\ & + \frac{1}{2} \sin^2 \delta \sin 2\alpha \sin 2\varphi \sin \theta \end{aligned}, \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{vv} = & \sin^2 \delta \cos^2 \alpha \cos^2 \varphi \sin^2 \theta + \sin^2 \delta \sin^2 \alpha \sin^2 \varphi + \cos^2 \delta \cos^2 \varphi \cos^2 \theta - \\ & - \frac{1}{2} \sin 2\delta \cos \alpha \cos^2 \varphi \sin 2\theta + \frac{1}{2} \sin 2\delta \sin \alpha \sin 2\varphi \cos \theta - \\ & - \frac{1}{2} \sin^2 \delta \sin 2\alpha \sin 2\varphi \sin \theta \end{aligned}, \quad (2.52)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{hv} = & \frac{1}{2} \sin 2\varphi (\sin^2 \delta \sin^2 \alpha - \sin^2 \delta \cos^2 \alpha \sin^2 \theta - \cos^2 \delta - \\ & - \sin 2\delta \cos \alpha \sin 2\theta) - \frac{1}{2} \cos 2\varphi (\sin 2\alpha \sin^2 \delta \sin \theta - \sin 2\delta \sin \alpha \cos \theta) \end{aligned}. \quad (2.53)$$

Коефіцієнти Φ_{hh} і Φ_{vv} набувають значення від 0 до 1, а коефіцієнт Φ_{hv} – від -0,5 до 0,5 у разі зміни кутів α , β , φ і θ від $-\pi$ до π (рис. 2.8, а, б, в). Формула (2.53) у роботі приведена у виправленому вигляді і відрізняється від опублікованої в [51].

На рис. 2.8, а) наведено значення коефіцієнта Φ_{hh} для кутів α і δ у діапазоні від $-\pi$ до π при $\varphi = 0$ і $\theta = 0$. На рис. 2.8, б) наведено значення коефіцієнта Φ_{vv} для кутів α і δ у діапазоні від $-\pi$ до π при $\varphi = 0$ і $\theta = 0$, а на рис. 2.8 в) наведено значення коефіцієнта Φ_{hv} для кутів α і δ у діапазоні від $-\pi$ до π при $\varphi = 0$ і $\theta = 0$.

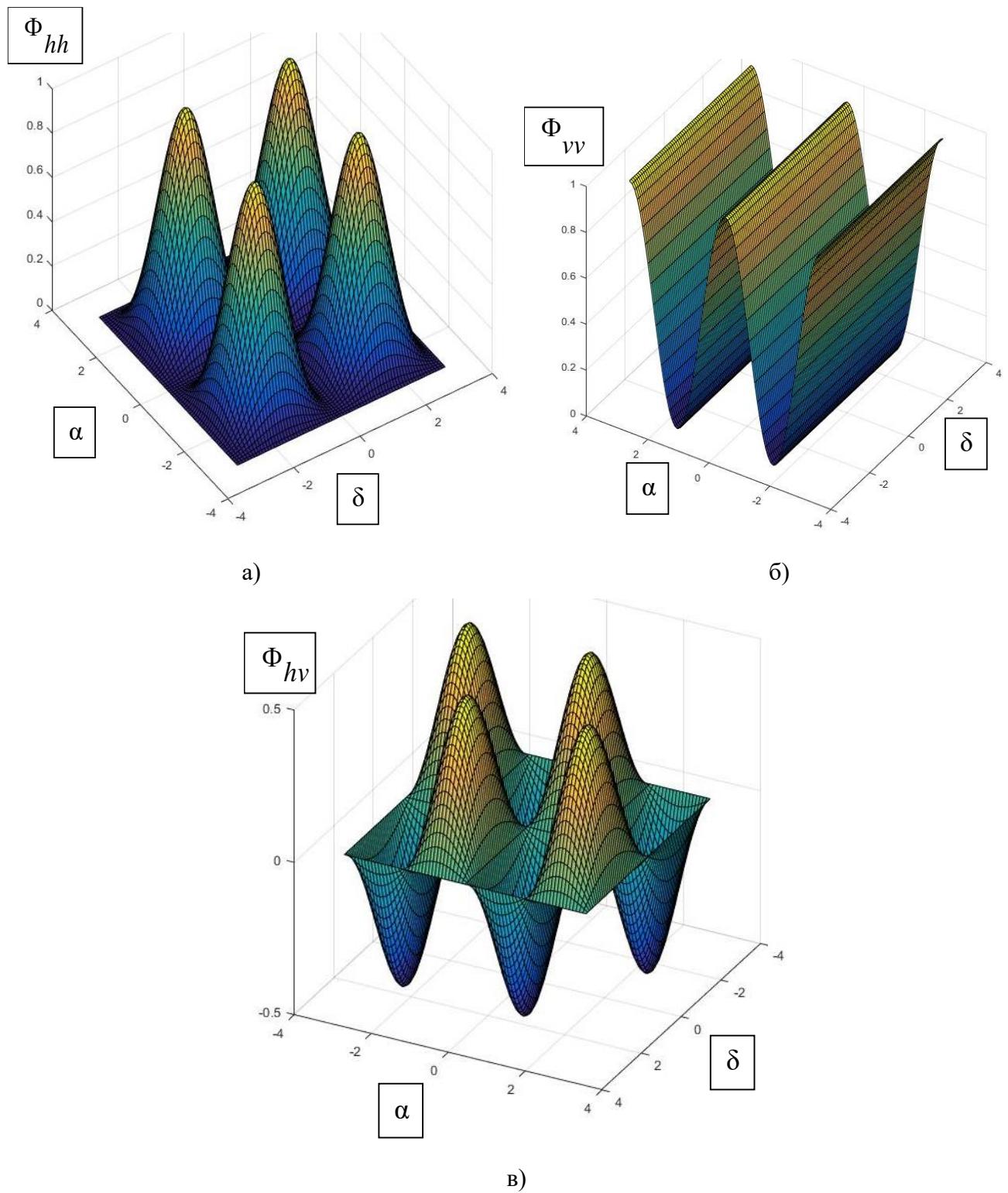


Рис. 2.8. Значення коефіцієнтів Φ_{hh} , Φ_{vv} та Φ_{hv}

Розглянемо деякий конкретний еліпсоїд з відомими співвідношеннями між півосями a_1 і $a_2 = a_3$, а також заданими кутами повороту α, δ , кутом нахилу площини поляризації ϕ і кутом повороту антени радіолокатора відносно площини горизонту θ . Для такого еліпсоїда у формулі (2.20) відношення квадратів елементів коваріаційної

матриці зворотного розсіювання $\frac{|S_{hh}|^2}{|S_{vv}|^2}$ може бути замінено співвідношенням ЕПР на

різних поляризаціях $\frac{\sigma_{hh}}{\sigma_{vv}}$. А з урахуванням формул (2.45) – (2.47) і взаємних

скорочень однакових параметрів у чисельнику і знаменнику, $\frac{\sigma_{hh}}{\sigma_{vv}}$ далі можна замінити

співвідношенням коефіцієнтів $\frac{q_{hh}}{q_{vv}}$, що враховують одночасно як форму, так і

орієнтацію даного розсіювача. Отже, для однієї частинки диференціальна відбиваність можна розрахувати як

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{\sigma_{hh}}{\sigma_{vv}} = 10 \log \frac{q_{hh}}{q_{vv}}. \quad (2.53)$$

Аналогічно для формул (2.21) і (2.22) рівняння лінійного деполяризаційного відношення для одного еліпсоїда матиме вигляд:

$$LDR_{hv} = 10 \log \frac{\sigma_{hv}}{\sigma_{vv}} = 10 \log \frac{q_{hv}}{q_{vv}}, \quad (2.54)$$

$$LDR_{vh} = 10 \log \frac{\sigma_{vh}}{\sigma_{vv}} = 10 \log \frac{q_{vh}}{q_{vv}}. \quad (2.55)$$

2.3. Поляриметричний підхід до розрахунку параметрів радіолокаційного сигналу, відбитого від хмари еліпсоїдів

2.3.1. Статистичні параметри і розподіли в хмари

Розглянемо тепер більш наближену до реальності ситуацію, коли необхідно визначити параметри радіолокаційного сигналу, відбитого не від однієї частинки у формі еліпсоїда, а від сукупності (хмари) подібних частинок. Однією із характеристик цієї сукупності є розподіл частинок за розмірами, або залежність кількості цих частинок у досліджуваному об'ємі від їх деякого характерного розміру $N(L)$, де N – кількість частинок, а L – наприклад, довжина або діаметр. При цьому самі частинки матимуть різні співвідношення між осями залежно від свого розміру. Як правило, чим більший розмір частинки, тим сильніше виявляється диспропорція між її розмірами в ортогональних площинах виміру. Тоді з урахуванням (2.39) і (2.42) формула (2.53) для розрахунку диференціальної відбиваності деякого об'єму, заповненого умовними еліпсоїдами, набуде вигляду [51]:

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{\Sigma_{hh}}{\Sigma_{vv}}; \quad (2.56)$$

аналогічно для формули (2.54)

$$LDR_{hv} = 10 \log \frac{\Sigma_{hv}}{\Sigma_{vv}}, \quad (2.57)$$

де

$$\Sigma_{hh} = \int \int \int_{D_e \alpha \delta} \sigma_{hh}(D_e, \alpha, \delta, \phi, \theta, \Lambda, \varepsilon) N(D_e) p(\alpha) p(\delta) d\delta d\alpha dD_e, \quad (2.58)$$

$$\Sigma_{vv} = \int \int \int_{D_e \alpha \delta} \sigma_{vv}(D_e, \alpha, \delta, \phi, \theta, \Lambda, \varepsilon) N(D_e) p(\alpha) p(\delta) d\delta d\alpha dD_e, \quad (2.59)$$

$$\Sigma_{hv} = \int \int \int_{D_e \alpha \delta} \sigma_{hv}(D_e, \alpha, \delta, \phi, \theta, \Lambda, \varepsilon) N(D_e) p(\alpha) p(\delta) d\delta d\alpha dD_e. \quad (2.60)$$

Припускаємо, що Σ_{hh} , Σ_{vv} і Σ_{hv} – параметри, які залежать від таких факторів:

- розподілу частинок за розмірами, яке задається функцією $N(D_e)$ [52, 70, 71].

При цьому D_e – еквівалентний діаметр частинки, або діаметр рівновеликої за обсягом сфери. Якщо для розрахунку використовуються сильно витягнуті або стислі еліпсоїди, то необхідно перетворювати при розрахунку геометричні розміри еліпсоїда L (наприклад, довжину або діаметр) у D_e ;

- форми частинок і переважної орієнтації (початкового положення) головної півосі еліпсоїдів [72]. Орієнтація частинки визначається орієнтацією координатної осі u_1 , на якій розміщена головна піввісь еліпсоїда a_1 і яка пов'язана із системою координат частинки (див. рис. 2.4);

- імовірностей відхилення орієнтації частинок у просторі від цього початкового положення [50, 73]. Функції $p(\alpha)$ і $p(\delta)$ – задають імовірність того, що кути відхилення координатної осі u_1 набувають значення α і δ відповідно. Наприклад, за наявності досить сильної турбулентності частинки можуть бути орієнтовані в просторі хаотично, не маючи якогось переважного положення. А в спокійному повітрі краплі дощу і крижані кристали приймають переважно горизонтального положення, створюючи максимальний опір зустрічному потоку повітря під час падіння [74, 75].

Ці фактори впливають на значення коефіцієнтів q_{hh} , q_{vv} і q_{hv} , що входять у σ_{hh} , σ_{vv} і σ_{hv} (формули (2.42) – (2.44)).

Інтегрування у формулах (2.58), (2.59) і (2.60) береться на всьому діапазоні значень змінних. Так, для D_e межі інтегрування будуть від мінімального значення еквівалентного діаметра еліпсоїда $D_{e min}$ до максимального $D_{e max}$. За кутами нахилу α і σ інтегрування в межах $0 \dots 2\pi$ або $-\pi \dots \pi$ дає однакові результати.

Переходячи до числових методів розрахунку, інтегрування можна замінити дискретним підсумовуванням, і з урахуванням формул (2.42), (2.43) і (2.44) маємо:

$$\Sigma_{hh} = \sum_{D_e=D_{e min}}^{D_{e max}} \sum_{\alpha=0}^{\pi} \sum_{\delta=0}^{\pi} \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\varepsilon_r - 1|^2 q_{hh} N(D_e) p(\alpha) p(\delta); \quad (2.61)$$

$$\Sigma_{vv} = \sum_{D_e=D_e \min}^{D_e \max} \sum_{\alpha=0}^{\pi} \sum_{\delta=0}^{\pi} \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\varepsilon_r - 1|^2 q_{vv} N(D_e) p(\alpha) p(\delta); \quad (2.62)$$

$$\Sigma_{hv} = \sum_{D_e=D_e \min}^{D_e \max} \sum_{\alpha=0}^{\pi} \sum_{\delta=0}^{\pi} \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\varepsilon_r - 1|^2 q_{hv} N(D_e) p(\alpha) p(\delta). \quad (2.63)$$

Тут $i = 0,01; 0,02 \dots D_{e \max}$ – дискретні значення ефективного діаметра розсіювачів. Величина $D_{e \max}$ може досягати значень порядку 0,8 мм для хмарних крапель [50], 2 мм для крапель дощу і декількох міліметрів для крижаних кристалів [50]; $j = 0,1 \dots 180^\circ$ – дискретні значення кута нахилу еліпсоїда α відносно площини горизонту; $k = 0,1 \dots 180^\circ$ – дискретні значення кута нахилу еліпсоїда δ щодо площини горизонту.

З урахуванням дискретних значень кутів нахилу і розмірів розсіювачів вираз (2.23) для розрахунку коефіцієнта кореляції при нульовому зсуві між горизонтальною і вертикальною компонентами відбитого сигналу для деякого об'єму, заповненого еліпсоїдами, можна записати як:

$$\rho_{hv}(0) = \frac{\left[\sum_{\alpha=0}^{\pi} \sum_{\delta=0}^{\pi} \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\varepsilon_r - 1|^2 q_{hh} N(D_e) p(\alpha) p(\delta) \dots \right] \dots \left[\sum_{\alpha=0}^{\pi} \sum_{\delta=0}^{\pi} \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\varepsilon_r - 1|^2 q_{vv} N(D_e) p(\alpha) p(\delta) \right]}{\sqrt{\left[\sum_{D_e=D_e \min}^{D_e \max} \left(\sum_{\alpha=0}^{\pi} \sum_{\delta=0}^{\pi} \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\varepsilon_r - 1|^2 q_{hh} N(D_e) p(\alpha) p(\delta) \right)^2 \right]} \dots \sqrt{\left[\sum_{D_e=D_e \min}^{D_e \max} \left(\sum_{\alpha=0}^{\pi} \sum_{\delta=0}^{\pi} \frac{\pi^5 D_e^6}{9\lambda^4} |\varepsilon_r - 1|^2 q_{vv} N(D_e) p(\alpha) p(\delta) \right)^2 \right]}}. \quad (2.64)$$

2.3.2. Рівномовірна орієнтація кристалів в об'ємі хмари

Розглянемо спочатку варіант абсолютно хаотичної орієнтації розсіювачів у досліджуваному об'ємі простору – це може спостерігатися, наприклад, внаслідок сильної турбулентності повітряних потоків у хмарі [76, 77]. Якщо позначити

орієнтацію частинки за допомогою точки перетину вертикальної осі кристала з одиничною сферою (при цьому центр сфери збігатиметься з геометричним центром еліпсоїда, яким підміняється реальна форма частинки) то отримаємо картину, зображену на рис. 2.9:

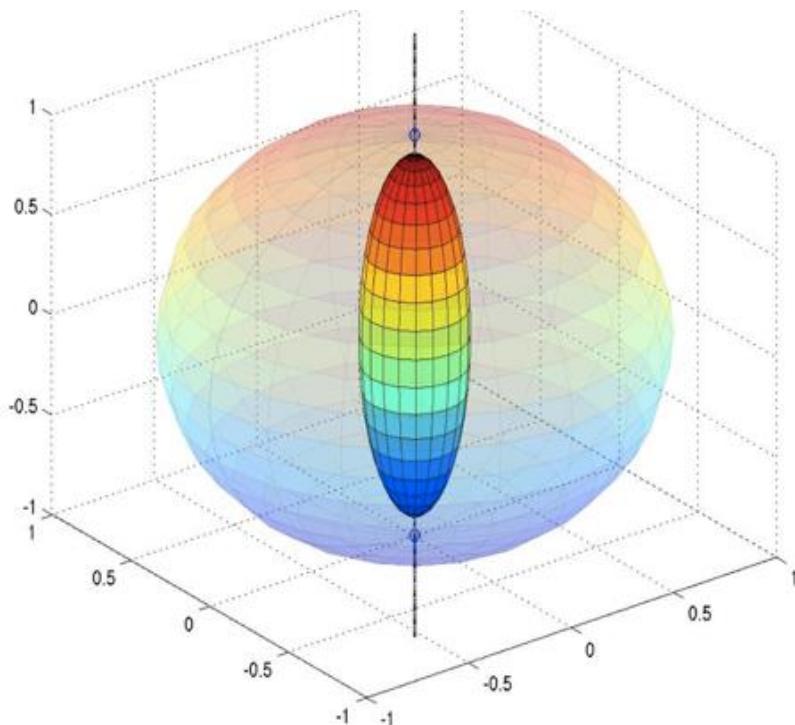


Рис. 2.9. Точки перетину поздовжньої осі частинки з одиничною сферою для одного кристала

Тоді задача опису абсолютно хаотичного розподілу частинок у просторі можна графічно подати у вигляді задачі рівномовірного розподілу точок на поверхні одиничної сфери. Це питання більш складне, ніж здається на перший погляд. Річ у тім, що спроба просто задати хаотичну (рівномовірну) орієнтацію частинок у просторі через рівномовірний розподіл кутових координат, як це логічно було б припустити, призводить в результаті до більш концентрованого скупчення точок на полюсах і менш концентрованої (більш розрідженої) множини точок на екваторі віртуальної одиничної сфери (див. рис. 2.10, 2.11).

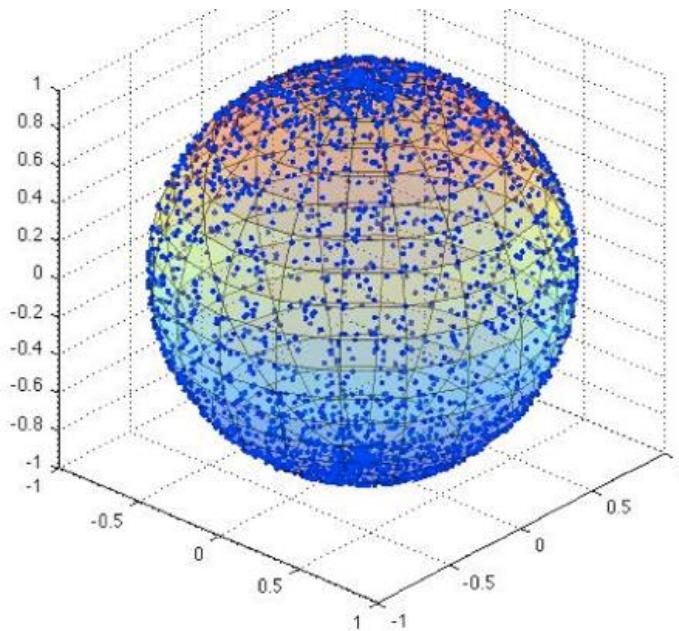


Рис. 2.10. Точки перетину поздовжньої осі частинки з одиничною сферою для багатьох частинок

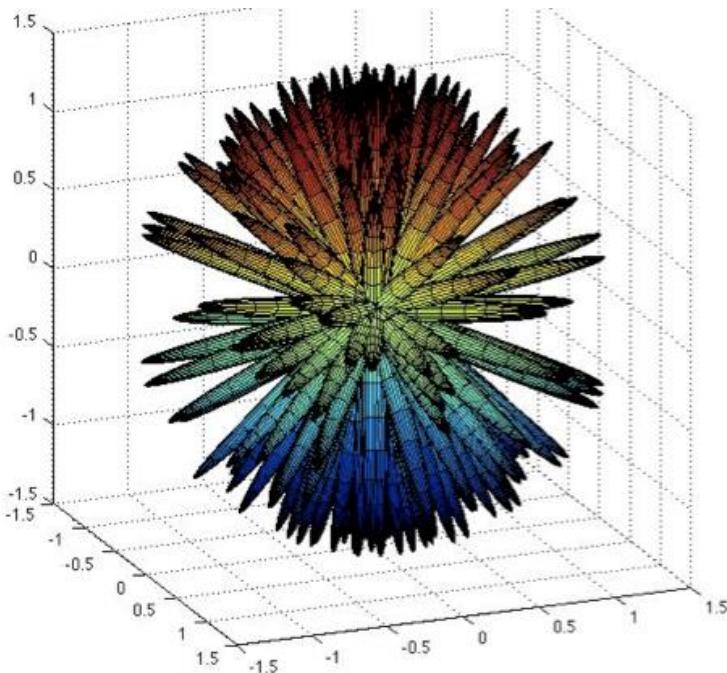


Рис. 2.11. Сукупність положень частинки в просторі за нерівномовірному (не абсолютно хаотичного) розподілу поздовжніх осей

Вирішення завдання рівномірного розподілу точок на поверхні сфери і відповідно рівномовірного просторового розподілу поздовжніх осей кристалічних частинок в просторі можна бути отримано за допомогою такого алгоритму [78]:

- задаємо велику кількість (декілька тисяч) рівномірно розподілених по трьох координатах точок в інтервалі 0...1;
- отримуємо масив точок у просторі, обмеженому обсягом куба з довжиною ребра рівною 1 (рис. 2.12);

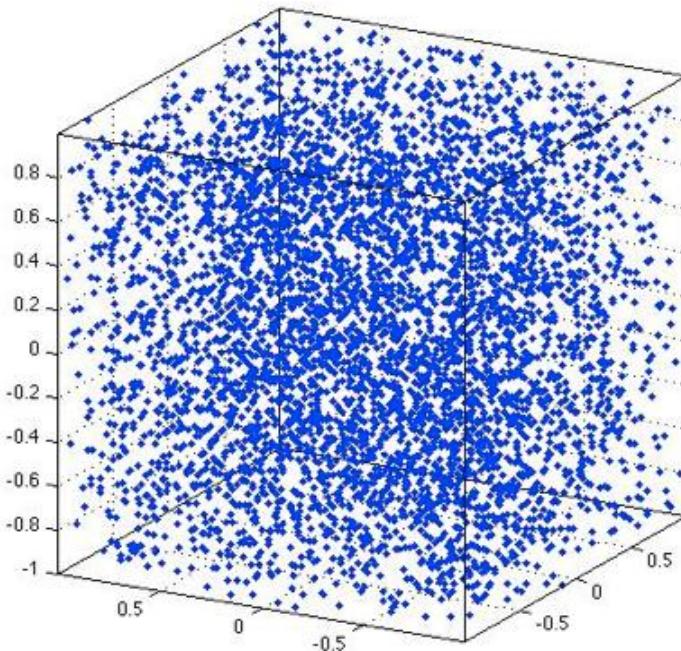


Рис. 2.12. Масив точок у просторі, обмеженому обсягом куба

- перевіряємо відстань від точки до центра координат за допомогою формули [78]

$$x^2 + y^2 + z^2 = R, \quad (2.65)$$

де x , y і z – проекції за трьома координатними осями відповідно; R – відстань до початку координат;

- залишаємо тільки ті точки, відстань до яких дорівнює 1 з деякою наперед заданою похибкою $E_r \ll R$, отримуємо майже рівномірний розподіл точок на сфері, і, відповідно, кристалів у просторі (рис. 2.13, 2.14).

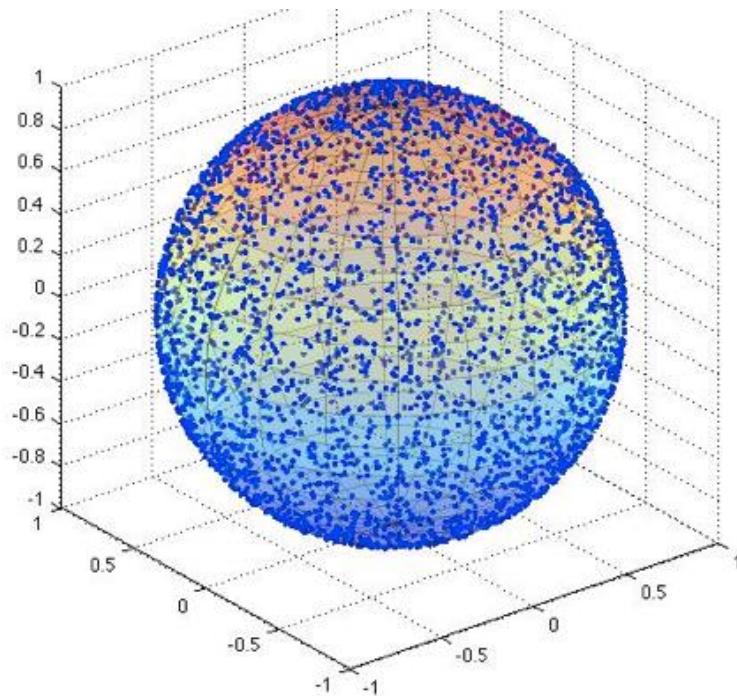


Рис. 2.13. Точки перетину поздовжньої осі частинки з одиничною сферою для багатьох частинок, орієнтація частинок – повністю хаотична.

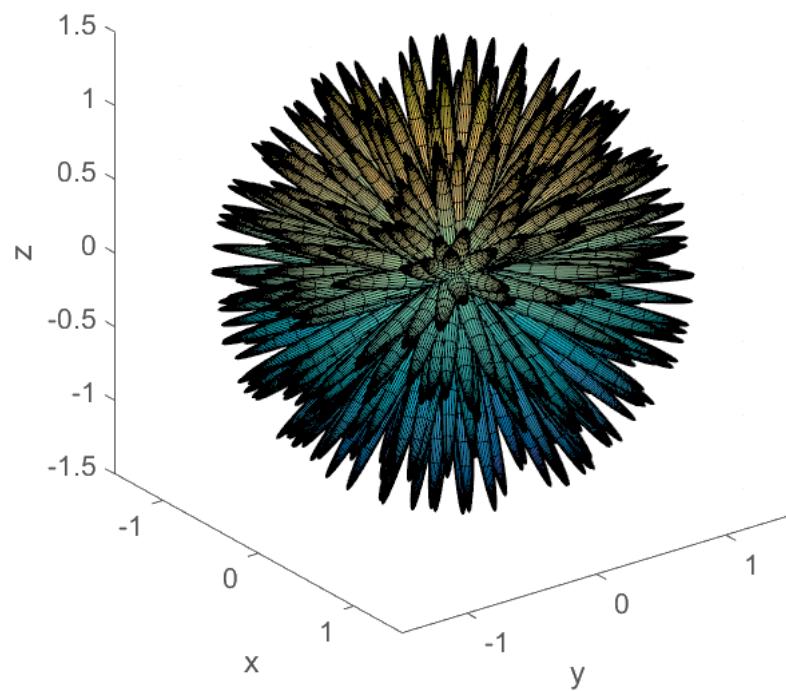


Рис. 2.14. Сукупність положень частинки в просторі за рівномовірного (хаотичного) розподілу поздовжньої осі

2.3.3. Переважно впорядкована орієнтація кристалів у хмарі

Розглянемо тепер варіант нерівномірної (хаотичної), а частково впорядкованої орієнтації кристалів у просторі, наприклад, усередині хмари, у якій відсутні сильні турбулентні завихрення повітря. У такому випадку кристали орієнтуються у просторі так, щоб надавати максимальний опір під час падіння [51, 74], а розподіл їх орієнтації у вертикальній площині можна описати за допомогою нормальног закону розподілу. Тут можна виокремити дві найбільш типові ситуації:

- 1) Турбулентність незначна або відсутня. Кристали орієнтовані переважно горизонтально, тобто у вертикальній площині розподіл кутів нахилу осей описується нормальним законом розподілу з математичним сподіванням 0° , і деякою дисперсією, яка залежить від ступеня турбулентності, а в горизонтальній площині розподіл кутів повороту можна вважати рівномірним;
- 2) Наявне сильне електричне поле, під дією якого кристали прагнуть вишикуватись вертикально, або під деяким кутом до горизонту.

Розглянемо більш детально першу ситуацію, коли орієнтація кристалів переважно горизонтальна. Нормальний закон розподілу ймовірностей (розподіл Гауса) задається функцією щільності розподілу вигляду [50]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.66)$$

де μ – середнє значення (математичне сподівання) випадкової величини вказує координату максимуму кривої щільності розподілу; σ^2 – дисперсія. Для правильного розподілу точок на одиничній сфері можна скористатися попереднім алгоритмом, у дещо модифікованому вигляді:

- задаємо велику кількість рівномірно розподілених по двох координатах (x , y) точок в інтервалі $0\dots1$;
- по третій координаті (z) розподіл буде нормальним – в межах $-1\dots1$;

- отримуємо масив точок у просторі, обмеженому обсягом куба з довжиною ребра рівною 1 (рис. 2.15);
- перевіряємо відстань від точки до центра координат за допомогою формул (2.65), залишаючи тільки ті точки, відстань до яких дорівнює 1 з деякою наперед заданою похибкою $E_r \ll R$, отримуємо бажаний розподіл точок на сфері (рис. 2.16).

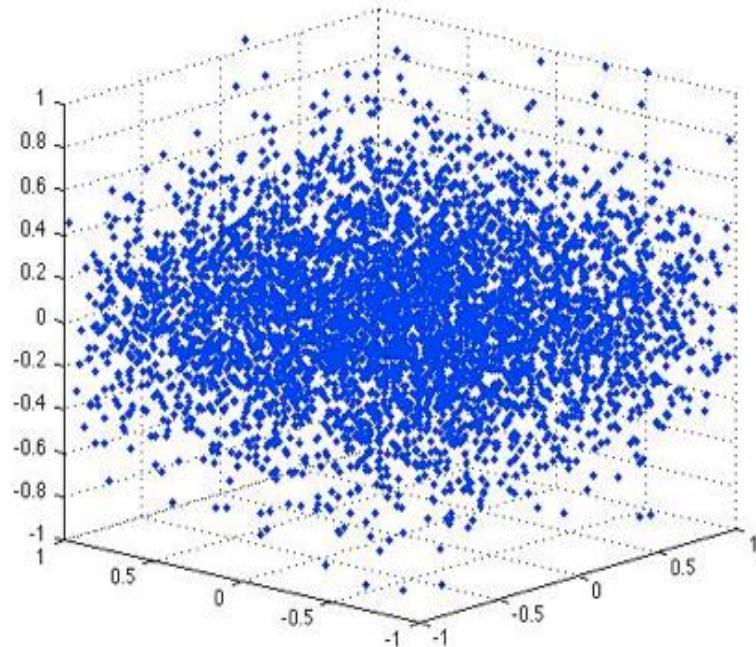


Рис. 2.15. Масив точок в просторі, обмеженому об'ємом куба. Розподіл по вертикальній осі – нормальний (Гауссовий), математичне сподівання – 0°

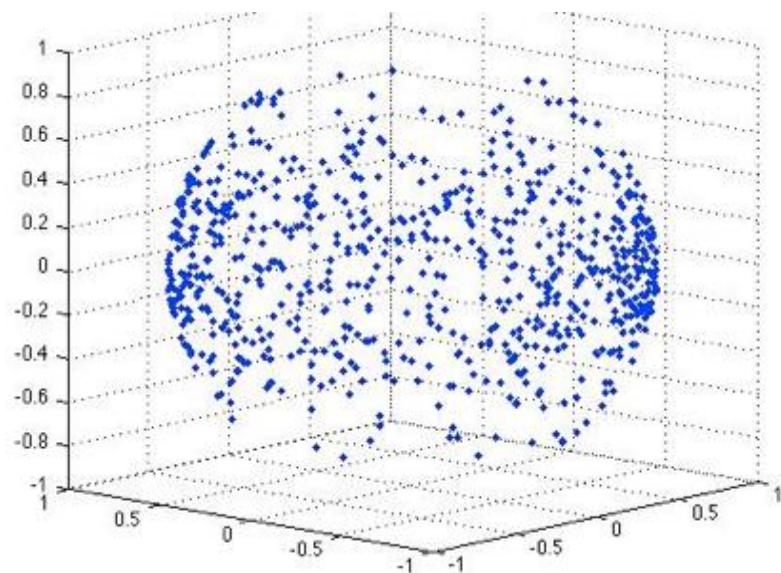


Рис. 2.16. Точки перетину поздовжньої осі частинки з одиничною сферою для багатьох частинок, орієнтація частинок – переважно горизонтальна

Варіанти просторового розподілу гідрометеорів за переважно горизонтальної орієнтації частинок для витягнутих і сплюснених еліпсоїдів, що підміняють форму реальних частинок, показано на рис. 2.17 і 2.18.

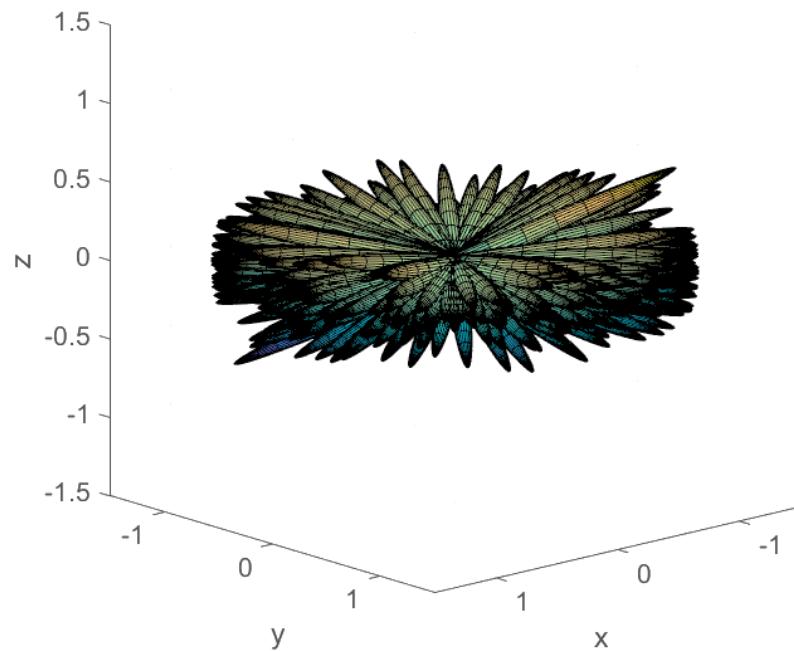


Рис. 2.17. Сукупність положень частинки в просторі за переважно горизонтальної орієнтації. Тип частинок – голки

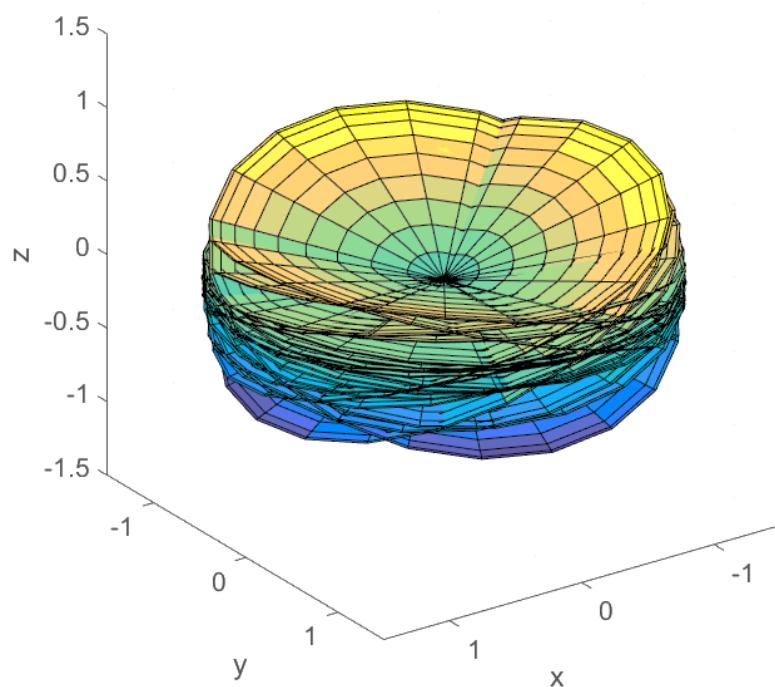


Рис. 2.18. Сукупність положень частинки в просторі за переважно горизонтальної орієнтації. Тип частинок – пластинки

Розглянемо тепер ситуацію, коли кристали орієнтовані переважно вертикально внаслідок впливу зовнішнього електричного поля. Точки перетину поздовжньої осі кристалів з одиничною сферою тоді можуть виглядати, як показано на рис. 2.19:

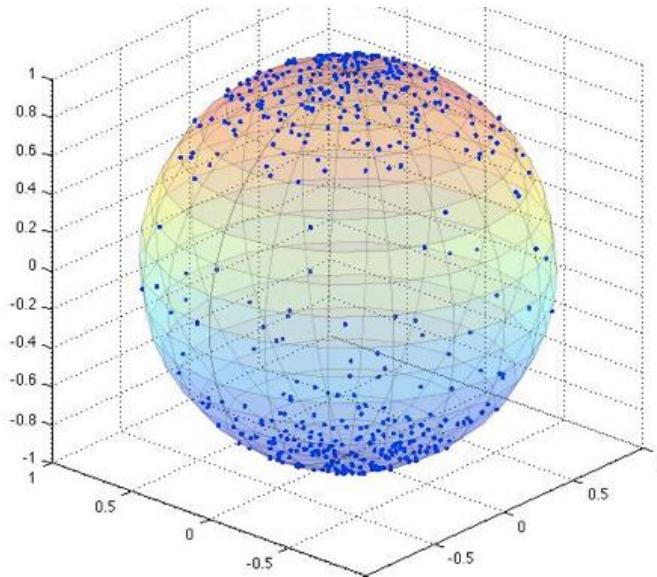


Рис. 2.19. Точки перетину поздовжньої осі частинки з одиничною сферою для багатьох частинок, орієнтація частинок – переважно вертикальна

Сукупність положень кристалів за такої орієнтації в просторі відповідно зображенено на рис. 2.20, 2.21.

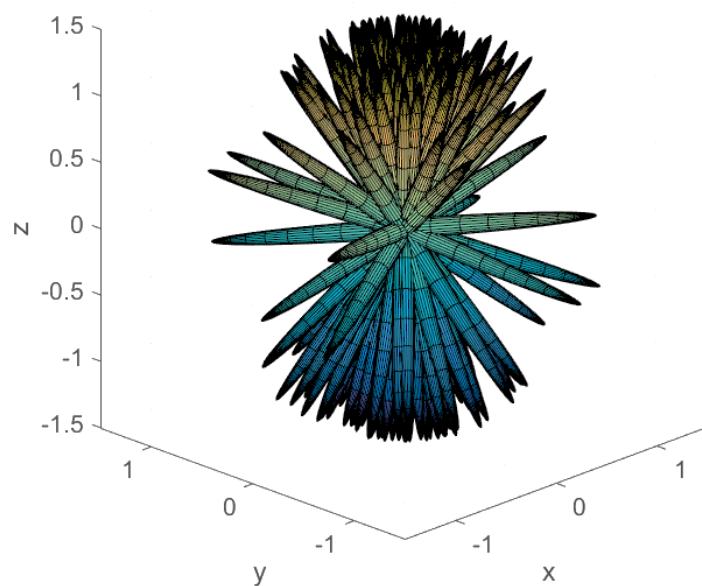


Рис. 2.20. Сукупність положень частинки в просторі за переважно вертикальної орієнтації. Тип частинок – крижані голки

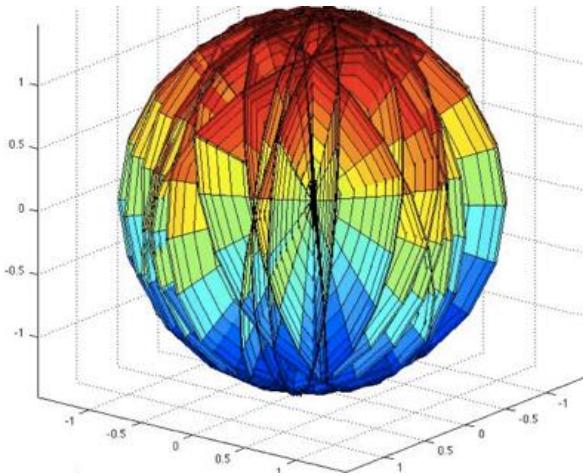


Рис. 2.21. Сукупність положень частинки в просторі за переважно вертикальної орієнтації. Тип частинок – крижані пластиинки

2.4. Поляризаційні характеристики рідких крапель (хмарних і дощових)

Визначимо, що являють собою переохоложені рідкі краплі у складі хмари. У вільному стані краплі рідини набувають форми ідеальної сфери [59]. Однак під час падіння сферична форма спотворюється під дією аеродинамічного опору повітря і набуває дещо сплюснутої форми.

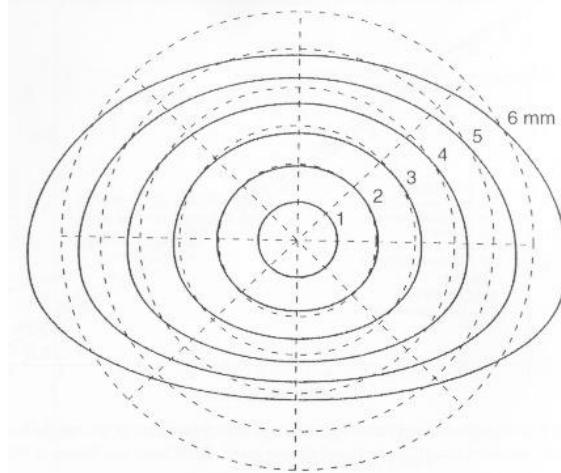


Рис. 2.22. Залежність форми краплі від розміру [61]

Як зазначено вище, у цій роботі для розрахунків прийнято спрощену і зручну для опису форму краплі у вигляді сфeroїда обертання, круглого в горизонтальній площині і сплюснутого у вертикальній. Насправді форма краплі відрізняється від

сфераїда, маючи більш плоский низ і похилий верх (рис. 2.22). Але в разі релєївського розсіювання, коли довжина хвилі λ значно більша від максимального розміру частинки, таке припущення цілком виправдане. Співвідношення між осями залежить від розміру краплі і для крапель дощу описується за виразом [57, 66]

$$\rho(D) = 0.5 \exp\left(-\frac{D^2}{27}\right) + 0.5, \quad (2.67)$$

де $\rho(D)$ – співвідношення між півосями еліпсоїда; D – найбільший розмір краплі. Скористаємося формулою (2.67) для того, щоб оцінити теоретично можливі відхилення крапель у хмарі від сферичної форми. Згідно з працею [50] максимальний розмір крапель у шаруватих хмараах не перевищує 0,1 мм, у шарувато-купчастих – 0,3 мм, а в потужних грозових хмараах (які і самі є небезпечними для польоту ПС навіть без урахування фактора можливого обледеніння) краплі можуть досягати розмірів 0,5...0,8 мм.

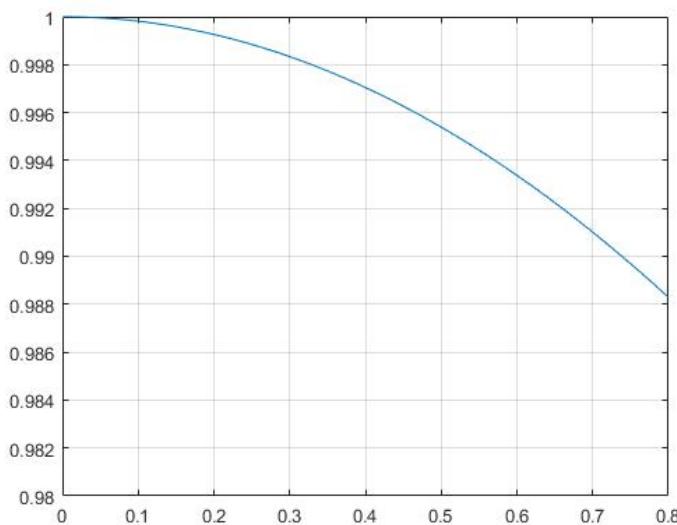


Рис. 2.23. Співвідношення між півосями еліпсоїда, що описує краплю води у падінні

З рис. 2.23 видно, що краплі розміром до 1 мм є майже ідеальними сферами з максимальним відхиленням в розмірах близько 1%. Довіак у праці [59] підтверджує, що краплі діаметром меншим за 0,35 мм мають сферичну форму, а краплі діаметром до 1 мм добре описуються сфероїдом. Зазвичай [50] краплі води у хмарі значно менші

за 1 мм, що істотно спрощує розрахунок зворотного розсіювання ними електромагнітних хвиль. Приклади реального розподілу крапель за розмірами, наведено у виданні Довіака і Зрніча «Доплерівські радіолокатори і метеорологічні спостереження» (рис. 2.24) [59].

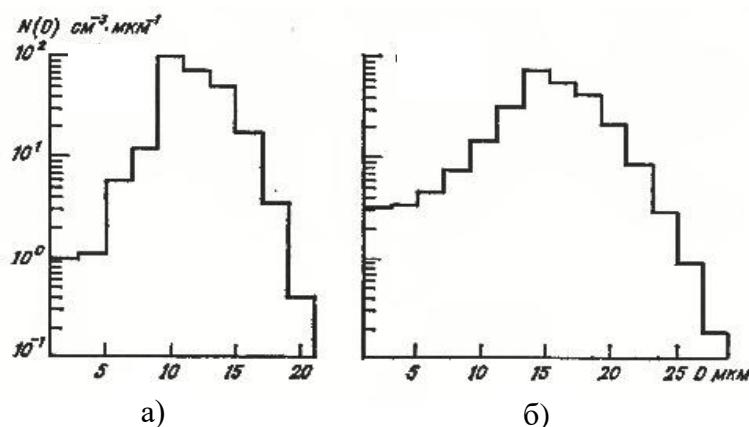


Рис. 2.24. Виміряні спектри розмірів хмарних крапель [59]

Діаграма зображена на рис. 2.24, а, ілюструє приклад розподілу в купчастій хмарі за сприятливої погоди, на висоті 4,7 км у слабовисхідному потоці (2...3 м/с), за температури -2 °C, приблизно на 200 м вище від підстави хмари. Виміряна водність хмари 0,55 г/м³, кількість крапель $N(D) = 523 \text{ см}^{-3}$. Наступна діаграма (рис. 2.24, б), описує спектр крапель у зростаючих потужних купчастих хмара на висоті 7,5 км, за температури -18 °C на 3,2 км вище від підстави хмари. Виміряна швидкість висхідного потоку 15 м/с, водність – 1.19 г/м³, $N(D) = 582 \text{ см}^{-3}$.

У хмара розподіл крапель за розмірами є досить мінливою характеристикою, яка може сильно залежати від масштабів осереднення [50]. За іншими даними, розподіл крапель за розмірами в хмара може мати вигляд, показаний на рис. 2.25 [50].

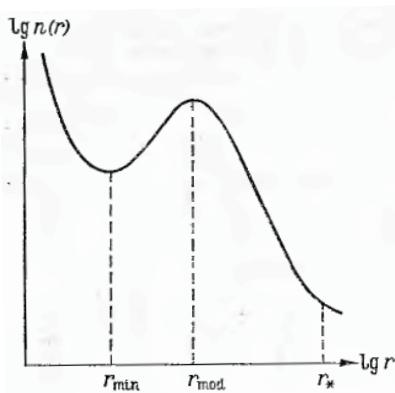


Рис. 2.25. Альтернативні вимірювані спектри розмірів хмарних крапель [59]

Для розрахунку розподілу крапель за розмірами у хмарі у цій роботі використано ту ж формулу, що й для оцінювання розподілу крапель у дощі [51, 56]:

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp\left(-\frac{3.67 + \mu}{D_0} D\right), \quad (2.68)$$

точніше її окремий випадок, коли масштабний коефіцієнт $\mu = 1$. Розподіл крапель з розміром в 1 м^3 згідно з формулою (2.68) зображене на рис. 2.26.

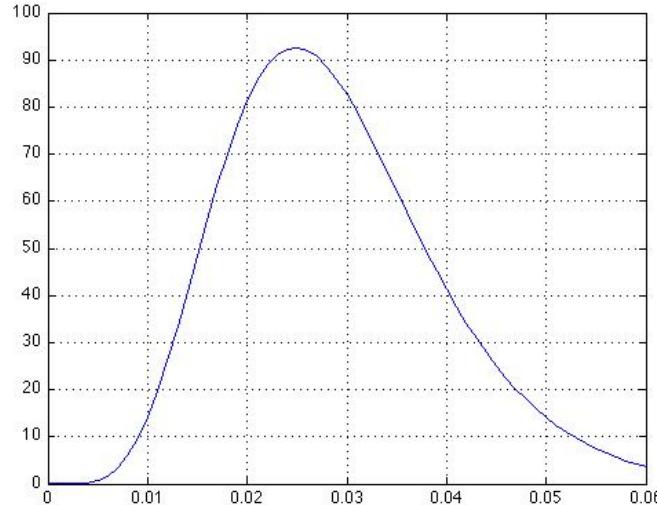


Рис. 2.26. Спектр розмірів хмарних крапель, прийнятий для розрахунку [50]

У формулі (2.68) N_0 – масштабна стала, що дорівнює $8000 \text{ мм}^{-1}\text{м}^{-3}$; D_0 – параметр розподілу, який за фізичним змістом є діаметром краплі медіанного (умовний діаметр крапель: загальна маса крапель з діаметром більшим від

медіанного дорівнює їх загальний масі з діаметром меншим за медіанним) об'єму. Функція $N(D)$ являє собою себе залежність кількості крапель, еквівалентний діаметр яких лежить в інтервалі розрахунку $D \dots D + \Delta D$ від цього самого розміру D на одиницю об'єму. Ця формула називається експоненціальним розподілом Маршалла–Пальмера [50, 59] і є окремим випадком гамма-розподілу. На горизонтальній осі графіка показано розмір краплі, а на вертикальній – кількість крапель цього розміру. Для розрахунків поляриметричних параметрів відбитого сигналу при моделюванні взято медіанний розмір $D_0 = 25$ мкм, а максимальний розмір крапель – 200 мкм. Ефективна поверхня розсіювання, як функція діаметра краплі для деякої довжини хвилі сканувального променя радіолокатора визначається за такою формулою [59]:

$$\sigma(D) = \pi^5 \frac{D^6 \cdot 10^{-18} \cdot 0.2}{\lambda^4}, \quad (2.69)$$

де $\sigma(D)$ – ЕПР, м^2 ; D – діаметр краплі; λ – довжина хвилі радіолокатора.

Розрахункові значення ДВ, ЛДВ і КК, виконані для радіолокатора X діапазону з $\lambda = 3$ см, наведено у табл. 2.2. Розглянемо спочатку найпростіший випадок дрібнокрапельної хмари, коли гідрометеори майже круглої форми, тобто не має сенсу стверджувати про переважну орієнтацію вертикальних осів сфероїдів, якими модулюються форми частинок, відносно горизонтальної площини. Але для інших об'єктів, таких як крапель дощу, крижаних кристалів або градин відбитий сигнал може відрізнятися за хаотичної або впорядкованої орієнтації вертикальних осей відносно горизонтальної площини для сфероїдів, що підмінюють форму реальних частинок.

Таблиця 2.2

Середні значення розрахованих поляриметричних параметрів

Тип частинки	ЛДВ (LDR_{hv})	ДВ (Z_{DR})	КК ($\rho_{hv}(0)$)
Хмарні краплі	Понад -70 дБ	~ 0 дБ	~ 1
Краплі дощу	-33...-47 дБ	0...0.45 дБ	~ 1

Як видно із табл. 2.2, диференціальна відбиваність (Z_{DR}) для хмарних крапель майже нульова незалежно від кута сканування за максимального розрахункового розміру краплі 0,2 мм. Цьому існує просте логічне пояснення: оскільки краплі круглі, проекції їх розмірів на горизонтальну і вертикальну площини майже ідентичні, потужності горизонтальної і вертикальної складових відбитого сигналу теж однакові, їх відношення дає одиницю, а логарифм цього співвідношення (формула (2.21)) відповідно дорівнює нулю [24].

Звернемо увагу на результати розрахунку лінійного деполяризаційного відношення (LDR_{hv}) сигналу, відбитого від крапельної хмари. Ця величина дуже мала, оскільки кросполяризаційна складова відбитого від сферичного об'єкта сигналу прагне до нуля, а логарифм співвідношення величин за формулою (2.21) прагне до мінус нескінченості ($-\infty$), коли крапля ідеально кругла. На практиці вимірюти настільки малі величини, як правило, досить важко, тому важливо відзначити те, що для хмари дрібних крапель параметр LDR буде меншим від деякого порога, зумовленого чутливістю приймача. Це явище буде згодом використано для створення алгоритму виявлення ЗНО [20]. У свою чергу, значення коефіцієнта кореляції, наведені в табл. 2.2, у випадку дрібнокрапельної хмари також не залежать від кута нахилу антени радіолокатора і дорівнюють одиниці. Результати розрахунку параметрів відбитого сигналу від крапельного хмари, наведені вище, можуть підтвердити правильність розгляданої теоретичної моделі. Оскільки для цієї порівняно простої моделі групової цілі, що складається із сукупності сферичних відбивачів, логічні викладки підтверджуються математичними розрахунками, є підстави припускати, що і для більш складних цілей розроблювана модель надаватиме коректні розрахункові значення відбитого сигналу.

На відміну від крапель у хмарі краплі дощу значно більші (але менші ніж кристали льоду) і можуть досягати розмірів близько 5...7 мм [50]. Унаслідок цього під час падіння під дією аеродинамічного опору повітря краплі деформуються і набувають вигляду, показаного на рис. 2.22. Співвідношення між горизонтальною і вертикальною осями сфераїда, що описує таку краплю, згідно з формулою (2.67) для

великих крапель може досягати 0,6...0,8, тобто поляризаційні властивості таких відбивачів будуть виражені значно сильніше, ніж для хмарних крапель [51, 57].

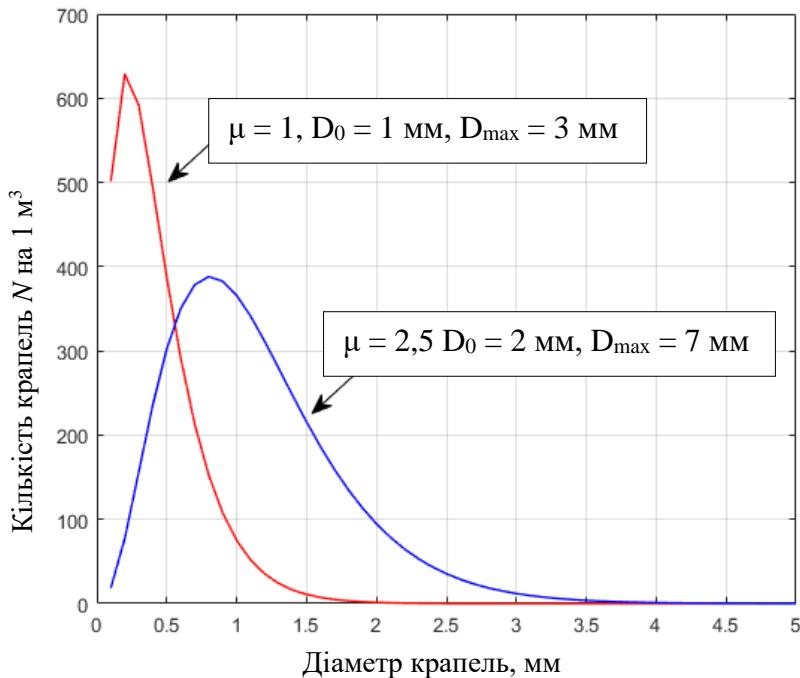


Рис. 2.27. Спектр розмірів дощових крапель, прийнятий для розрахунку [64]

Два варіанти розподілу крапель за розмірами, що використовувались для розрахунків, наведені на рис. 2.27:

- 1) помірний (затяжний) дощ із краплями медіанного діаметра $D_0 = 1$ мм з максимальним розміром крапель 3 мм і значенням масштабного коефіцієнту $\mu = 1$ (червона лінія);
- 2) сильна злива з медіанним діаметром крапель $D_0 = 2$ мм з максимальним розміром крапель 7 мм і значенням масштабного коефіцієнта $\mu = 2.5$ (синя лінія).

Результати розрахунку ДВ і ЛДВ для крапель дощу ілюструє рис. 2.28. Наведено розрахункові значення для двох варіантів: сильної зливи з великими краплями і дощу середньої інтенсивності з відносно дрібними краплями. По осі абсцис відкладено кути нахилу променя радіолокатора у вертикальній площині відносно горизонту при скануванні дрібнокрапельної хари, а по осі ординат – розрахункові значення поляриметричних параметрів відбитого сигналу.

Для ДВ і ЛДВ розрахункові значення наведено в децибелах, а коефіцієнт кореляції – безрозмірна величина. Такий формат відображення даних обрано з тих

міркувань, що сфераїдні частинки в горизонтальній площині мають круглий перетин, тобто не мають будь-якої орієнтації в горизонтальній площині відносно до антени, а несферичні частинки, як правило, розподілені в горизонтальній площині хаотично.

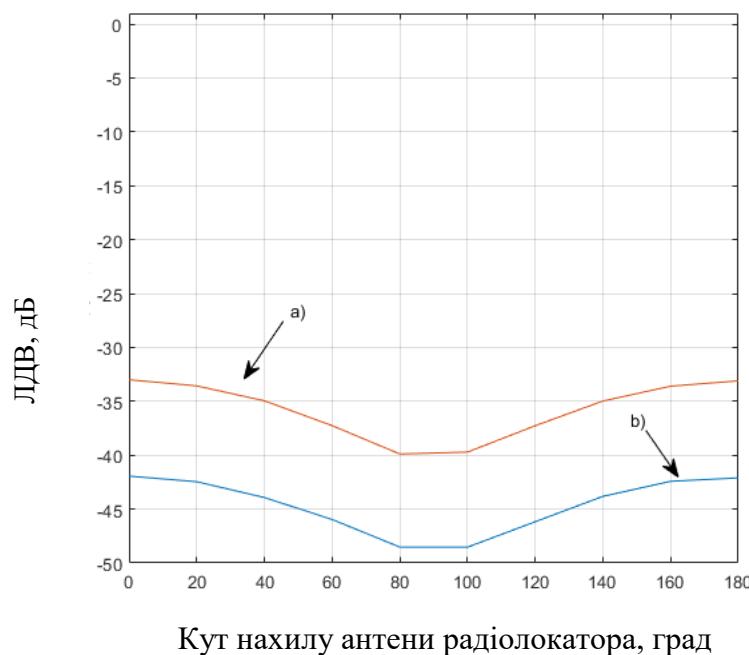
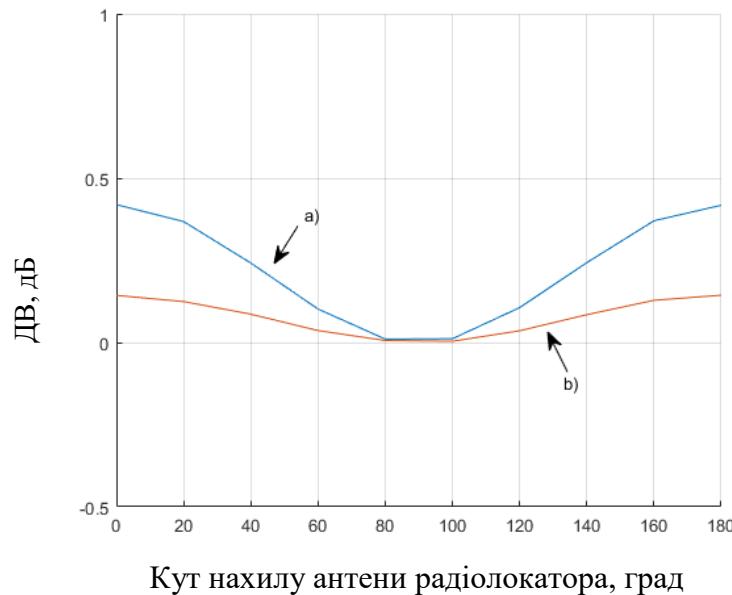


Рис. 2.28. Розрахункові значення параметрів ДВ і ЛДВ для крапель води у дощі:
- **a)** з максимальним розміром крапель 7 мм і середнім розміром 2 мм;
- **b)** з максимальним розміром крапель 3,5 мм і середнім розміром 1 мм
для різних кутів сканування відносно площини горизонту

Таким чином, результати розрахунків не залежать від взаємної орієнтації антени радіолокатора і досліджуваного метеооб'єкта в горизонтальній площині, однак можуть відрізнятися в загальному випадку залежно від їх взаємної орієнтації у вертикальній площині.

Варто зазначити, що ймовірність обледеніння під час сильної зливи мінімальна, а невеликий дрібний дощ якраз може бути небезпечним, оскільки він має здатність формуватися і за від'ємних температур навколошнього середовища, (*підрозділ 1.6, дод. I*).

2.5. Поляризаційні характеристики кристалів льоду

За від'ємних температур завжди існує ненульова ймовірність замерзання крапель у хмарах і появи кристалів [79, 80]. Якщо ця ймовірність дуже мала, то концентрація кристалів, що з'являються, настільки незначна, що вони майже не впливають ні на властивості хмар, ні на процеси, що в них відбуваються. У таких випадках кристали в хмарах часом навіть важко виявити нерадіолокаційними методами вимірювань [81, 85]. Тому на практиці подібні хмари в англомовній літературі називають рідкими (*liquid*), а у нас – крапельними. Реальна концентрація кристалів N_i у крапельних хмарах за від'ємних температур не перевищує 1 л^{-1} , тобто зазвичай нижча за концентрацію крапель більш ніж у $10^5 \dots 10^6$ раз [50]. Однак навіть за такої низької концентрації кристали можуть відігравати важливу, а часом і визначальну роль у формуванні опадів і відбитті радіолокаційного сигналу від хмари, оскільки розміри кристалів зазвичай в десятки і сотні разів перевищують розміри крапель [83, 84].

Форма кристалів великою мірою залежить від температури і вологості, за яких вони утворюються. Якщо вологість близька до рівноважної (до значення, відповідного стану насыщення над льодом), то за будь-якої температури $0 \dots -40^\circ\text{C}$ утворюються товсті шестигранні пластини, товщина яких приблизно вдвічі менша від діаметра. За вологості, близької до насыщення над водою (умови, за яких найчастіше і утворюються хмарні кристали), форма кристалів змінюється [50]. У хмарах верхнього ярусу, де температура не перевищує -20°C , переважною формою є стовпчики (пульки) і пучки стовпчастих кристалів. На рис. 2.29 показано детальну

типізацію атмосферних кристалів льоду, яка набула поширення – їх позначення і схематичні зображення, складені професором Хоккайдського університету (Японія) У. Накая (Ukichiro Nakaya) [86].

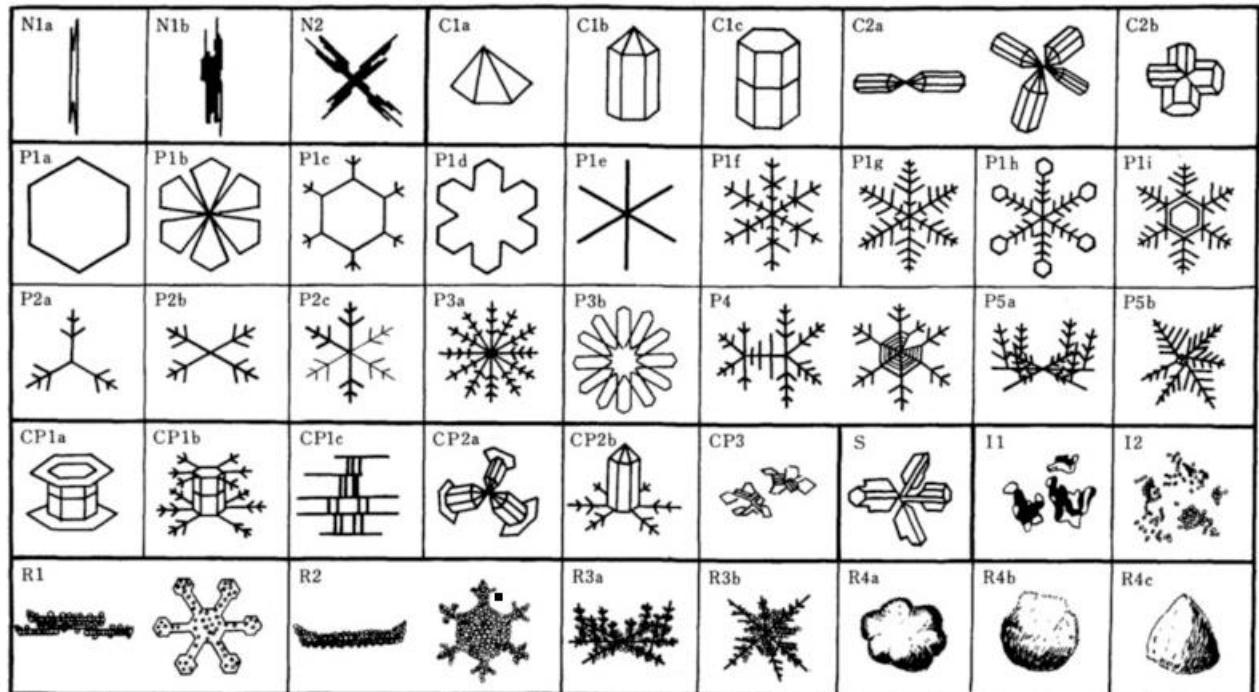


Рис. 2.29 Класифікація крижаних і снігових кристалів за Ukichiro Nakaya [86]

Форма хмарних кристалів, як бачимо, надзвичайно різноманітна. Одночасно в тій чи іншій частині хмари і тим більше в хмарі в цілому можуть бути присутні кристали різної форми. У цьому різноманітті, однак, вдається виявити певні закономірності. Для багатьох практичних завдань, пов'язаних насамперед з оптичними і радіаційними властивостями хмар, можна обмежитися більш простою класифікацією форм кристалів [50, 52, 53].

У 1951 р міжнародна комісія зі снігу і льоду прийняла досить просту класифікацію твердих опадів [52], яка набула значного поширення. Ця класифікація містить сім основних видів снігових кристалів (рис. 2.30): пластини F1, зірчасті кристали (дендрити) – F2, стовпці (колони) – F3, голки – F4, просторові дендрити – F5, стовпці з наконечником – F6 і неправильні кристали – F7. Крім того, існують також додаткові три види обледенілих опадів: дрібна снігова крупа – F8, крижаний дощ – F9 і град – F10 [82].

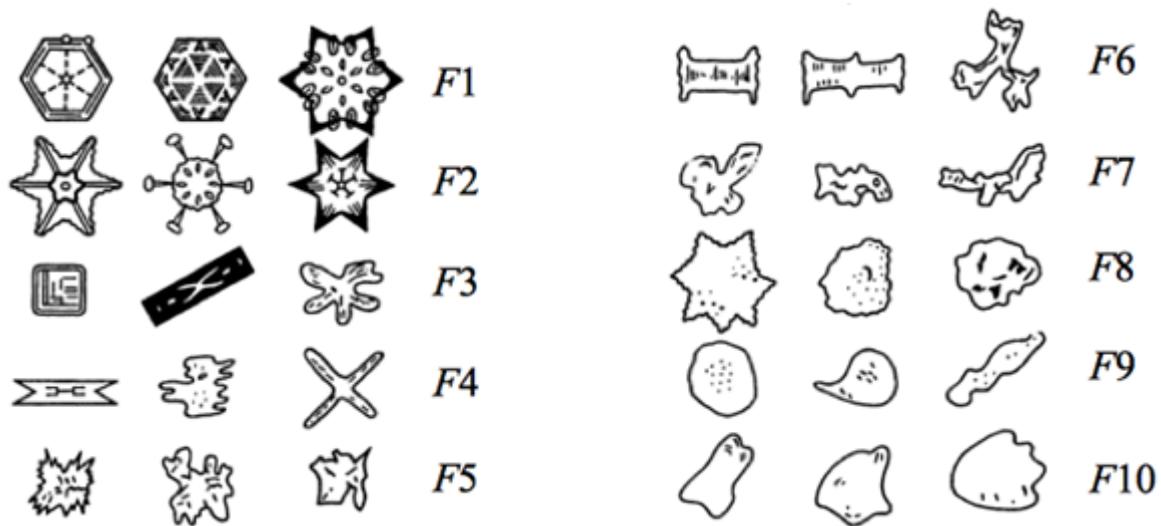


Рис. 2.30. Типи снігових кристалів відповідно до міжнародної класифікації [52]

Необхідно зазначити, що складні форми кристалів (сніг) утворюються переважно під час падіння з хмари, а в самій хмарі існують більш прості форми [50].

Деяку середню повторюваність тієї чи іншої форми кристалів у заданому діапазоні температур характеризує табл. 2.3:

Таблиця 2.3

Повторюваність (%) кристалів різних форм у хмарах за різної температури [50]

Форма кристалів	Температура, °C									
	0 ... - 4,0	- 4,1 ... - 7,0	- 7,1 ... - 10	- 10,1 ... - 13,0	- 13,1 ... - 16,0	- 16,1 ... - 19,0	- 19,1 ... - 22,0	- 22,1 ... - 25,0	- 25,1 ... - 28,0	- 28,1 ... - 31,0
Голки	22	25	-	-	-	-	-	-	-	-
Тонкі пластинки	67	62	71	45	12	2	3	-	-	-
Товсті пластинки	-	3	2	-	7	16	8	4	-	-
Стовпчики і пучки стовпчиків	11	10	25	50	71	70	77	88	88	100
Об'ємні (піраміdalні, безформні)	-	-	2	5	10	12	3	8	12	-

В окремих же випадках можуть бути помітні відхилення [94, 95]. Так, за температури близької до -5°C , трапляються хмари, що складаються переважно з голчастих кристалів. У цілому ж у діапазоні від 0 до -10°C переважно спостерігаються тонкі пластинчасті кристали. Зі зниженням температури дедалі частіше трапляються стовпчики, кульки, пучки стовпчиків, які за температури нижчої за -20°C становлять від 50 до 100% усіх кристалів. У діапазоні $-10\ldots-16^{\circ}\text{C}$ повторюваність тонких пластинок і стовпчиків приблизно однаакова. Таке велике відносне число стовпчиків пояснюється, імовірно, потраплянням їх з більш холодних верхніх шарів. У разі наднизьких температур (блізько -80°C), характерних для стратосферних хмар, можуть спостерігатися [50] товсті трикутні пластини (відношення товщини до діаметра близьке до 1) в суміші із стовпчиками. Досліджувані хмари перебували на висоті 16 км поблизу екватора [50].

Характерними розмірами кристалів пластинчастих форм є діаметр d і товщина h , а кристалів стовпчастих або голчастих форм – діаметр d і довжина L . Зазвичай товщина пластин і діаметр голок становлять десятки мікрометрів, а діаметр пластин і довжина голок коливаються від десятків (частіше від сотень) до тисяч мікрометрів. Для тонких пластин і дендритів h/d становить 0,01...0,2, для товстих пластин 0,2...0,5. Для голок $d/L = 0,04\ldots0,2$, а для стовпчиків і кульок $d/L = 0,2\ldots0,5$ [50].

Зв'язок h із d і d із L подають степеневою залежністю:

$$h = A \cdot d^\alpha, \quad (2.70)$$

$$d = B \cdot L^\beta. \quad (2.71)$$

Згідно з працею [50] $A \approx 10^{-2}$, $\alpha \approx 0.42$. Для деяких різновидів стовпчастих кристалів B змінюється від 0,3 до 0,6, а $\beta \approx 0,93 \pm 0,03$. Для голок $B = (0,03\ldots0,6) \cdot 10^{-2}$, а $\beta \approx 0,45\ldots0,6$.

Залежності діаметра від довжини для стовпчастих і голчастих типів кристалів показані на рис. 2.31. Відповідно до експериментальних даних, якщо кристали малі,

то можна вважати, що вони орієнтовані хаотично [50, 96]. Великі кристали орієнтуються переважно так, що опір середовища їх падінню був максимальний, а швидкість падіння, отже, мінімальна. Це означає, що великі кристали пластинчастих і голчастих форм орієнтуються, в основному, горизонтально [50]. При тій же довжині, стовпчики (зверху) мають значно більшу товщину.

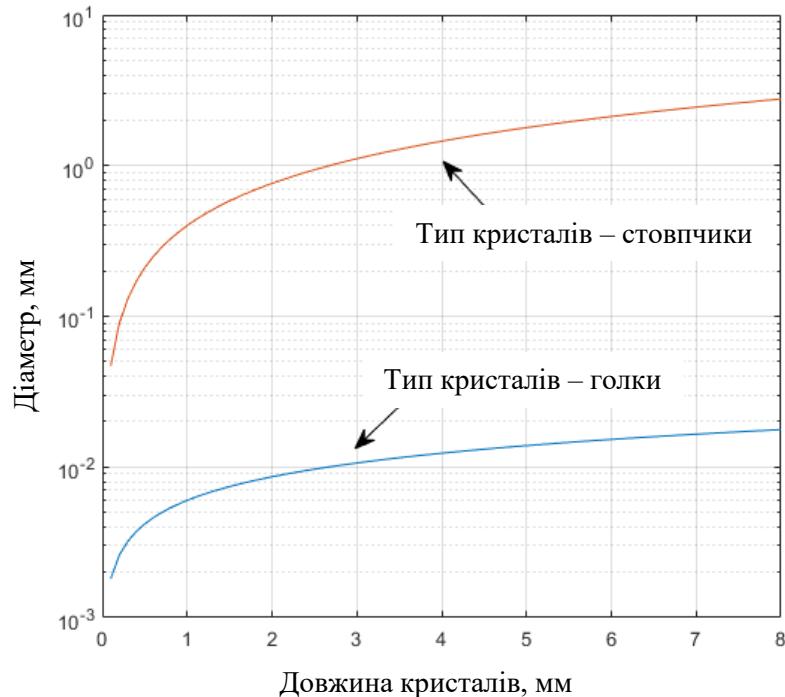


Рис. 2.31. По осі абсцис відкладена довжина стовпчастих і голчастих кристалів, по осі ординат – діаметр

Для розрахунку розподілу кристалів за розмірами в хмарі в даній роботі була прийнята формула із праці [50]:

$$N(L) = 1000 \cdot L^{-2.3}, \quad (2.72)$$

де N – кількість частинок; L – їх характерний розмір. Розподіл кристалічних частинок за розмірами згідно з формулою (2.72) має вигляд, наведений на рис. 2.32.

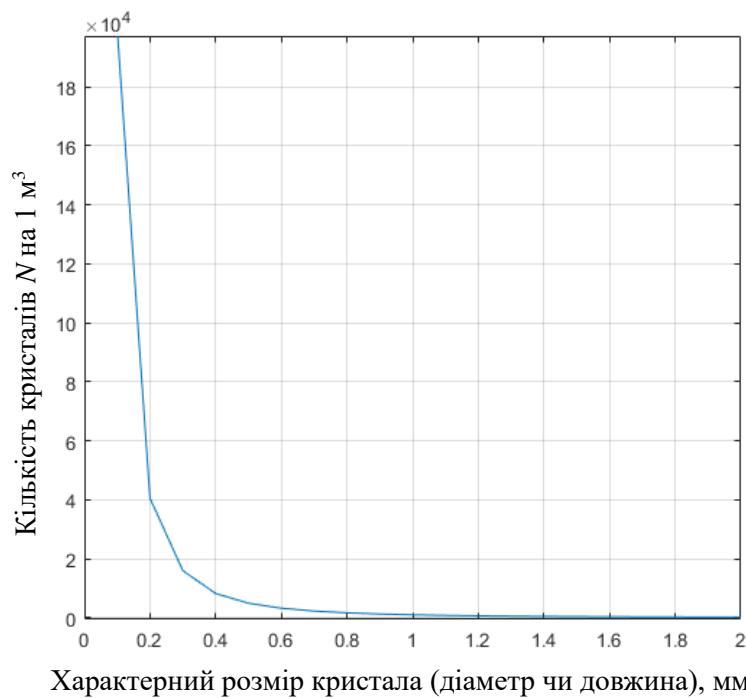


Рис. 2.32. Спектр розмірів кристалів льоду, використаний для розрахунку [50]

У табл. 2.4 наведено розрахункові значення ДВ, ЛДВ і КК для гіпотетичної хмари, що складається з одного типу кристалів – голок, стовпчиків або пластинок, орієнтованих у просторі в різних конфігураціях – від абсолютно хаотичної (наприклад, внаслідок турбулентних потоків повітря всередині хмари) до переважно впорядкованої в горизонтальній або вертикальній площині.

Таблиця 2.4

Середні значення розрахованих поляриметричних параметрів

Тип частинки	ЛДВ (LDR_{hv} , дБ)	ДВ (Z_{DR} , дБ)	КК ($\rho_{hv}(0)$)
Голки	-16....-14	-4... 0	~ 0,9
Стовпчики	-24... -20	-2...0	~ 1
Платівки	-21... -10	0... 4	~ 0,8

Розрахунки виконувались для двох варіантів кристалічної хмари: максимальний розмір частинок в якому дуже малий (0,1 мм) і дуже великий (досягає 8 мм).

Розрахункові значення ДВ і ЛДВ для голчастих кристалів малих і великих розмірів збігаються. Диференціальна відбиваність дорівнює нулю за хаотичної орієнтації частинок у просторі, оскільки велика кількість різнонапрямлених орієнтованих частинок дають приблизно однакові потужності горизонтальної і вертикальної поляризаційних складових відбитого сигналу. Лінійне деполяризаційне відношення у такому випадку може складати величину близько -24...-19 дБ. За переважно горизонтальної орієнтації частинок у спокійному повітрі у стовпчиків і голок ДВ прямує в область від'ємних значень близько до -4...-2 дБ для найбільших частинок, а у пластин а може сягати близько +5 дБ відповідно (рис. 2.33). ЛДВ кристалів за впорядкованої орієнтації частинок може становити -20...-10 дБ (рис. 2.34).

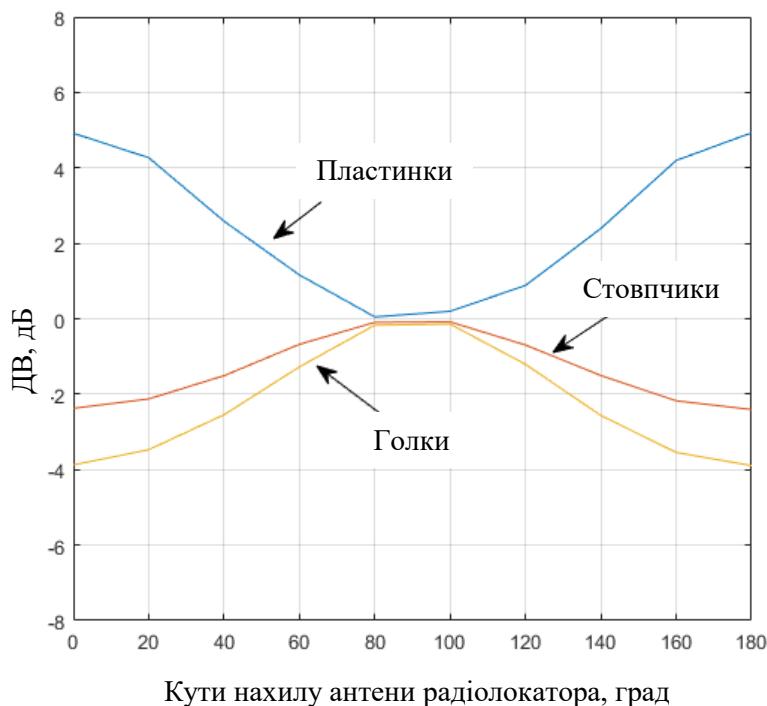


Рис. 2.33. Розраховані значення параметрів ДВ для хмари кристалів при переважно горизонтальній орієнтації частинок щодо антени радіолокатора [17]

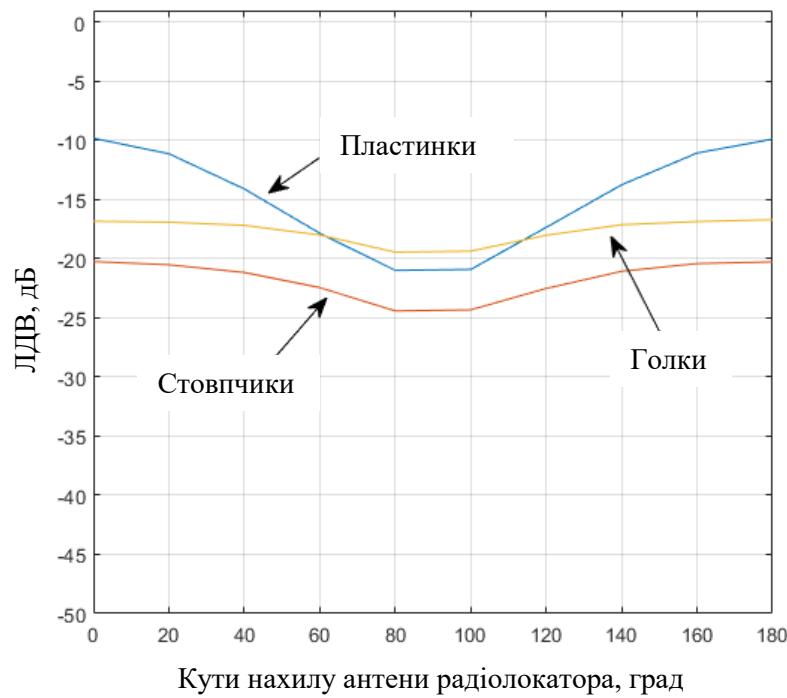


Рис. 2.34. Розрахункові значення параметрів ЛДВ для хмари кристалів при переважно горизонтальній орієнтації частинок щодо антени радіолокатора [17]

Типи еліпсоїдів, якими підмінялися реальні форми кристалів льоду, наведені на рис. 2.35–2.37:

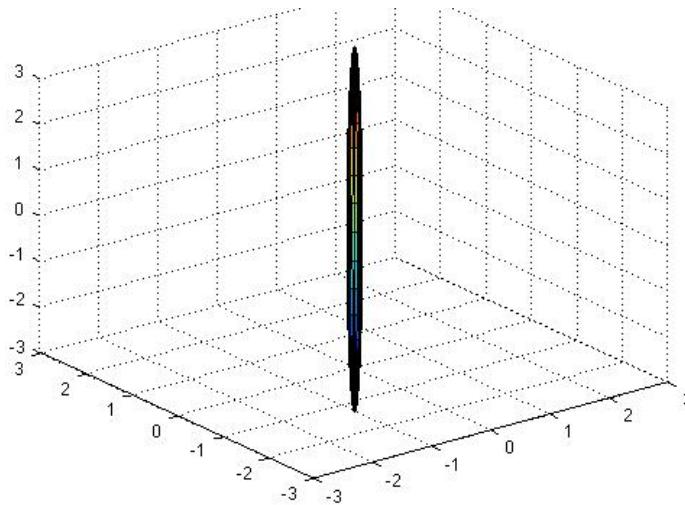


Рис. 2.35. Зовнішній вигляд еліпсоїда, яким підміняється справжня форма голчастих кристалів

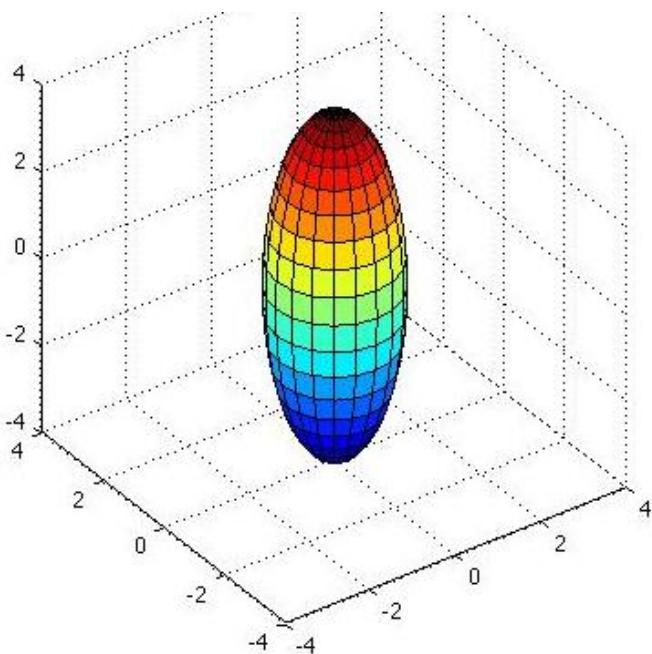


Рис. 2.36. Зовнішній вигляд еліпсоїда, яким підміняється справжня форма стовпчастих кристалів

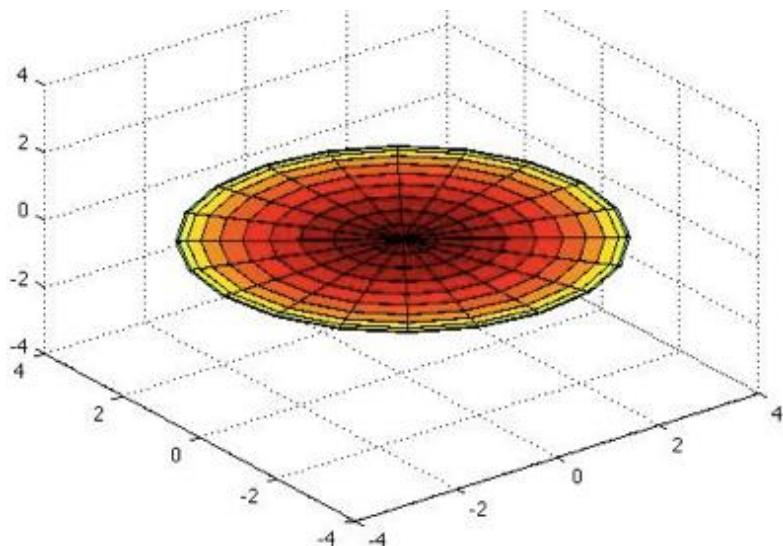


Рис. 2.37. Зовнішній вигляд еліпсоїда, яким підміняється справжня форма пластинчастих кристалів

Розрахункові значення КК майже не залежать від орієнтації частинок у хмарі, тільки від їх типу. Вони наведені в табл. 2.4.

2.6. Поляризаційні характеристики шару танення

Розглянемо випадок відбиття сигналів від шару танення [53, 87, 88]. Шар танення (*melting layer*) може розташовуватись у хмарі між областю кристалів і областю дощу. Схематично розташування такого шару показано на рис. 2.38 [51]. Частинки в шарі танення по суті являють собою крижані кристали, покриті водяною плівкою [89, 90, 91]. Частинки, покриті водяної плівкою, відбивають сигнали так, якби вони повністю складалися б з води.

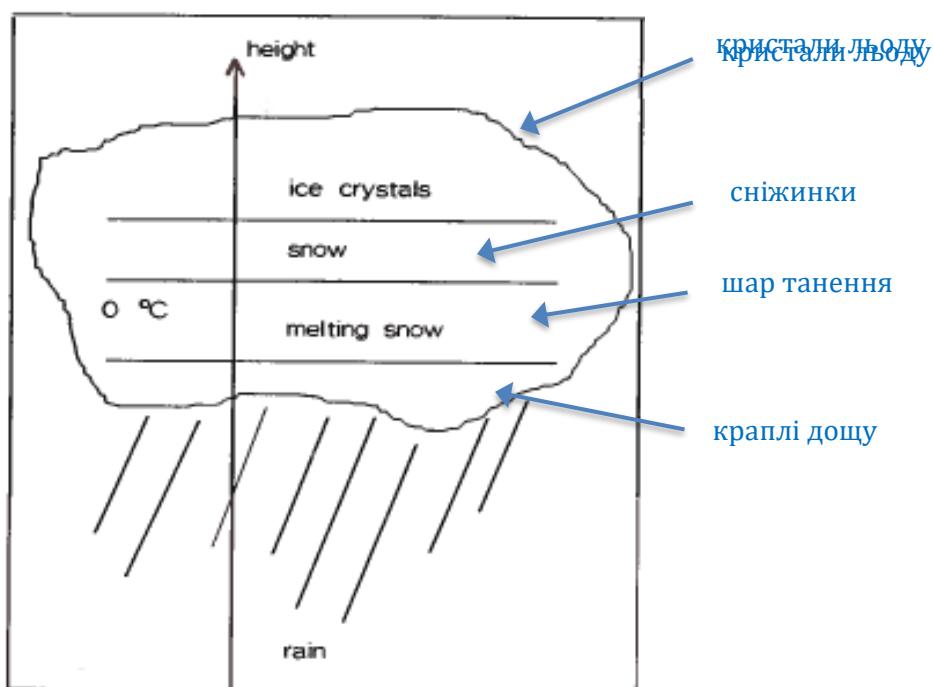


Рис. 2.38. Схематична будова дощової хмари [51]

Діелектрична стала ϵ набуває значення для льоду $\epsilon_{\text{льоду}} = 3$, а для води і для обводнених крижаних частинок $\epsilon_{\text{води}} = 81$. Значення поляриметричних параметрів відбитого сигналу для частинок у шарі танення наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Середні значення розрахованих поляриметричних параметрів

Тип частинки	ЛДВ (LDR_{hv} , дБ)	ДВ (Z_{DR} , дБ)	КК ($\rho_{hv}(0)$)
обводнені стовпчики	-12...-8	0...5	~ 1

Логічно припустити, що сили поверхневого натягу води на поверхні крижаного кристала будуть чинити деякий вплив на його форму [53]. Це робить малоймовірним існування дуже тонких або пласких частинок, тому для розрахунку відбитих сигналів від шару танення обрано тип частинок – стовпчики [92, 93]. Із таблиці видно, що значення ЛДВ можуть бутивищими ніж для кристалів або крапель, а значення ДВ лежати в області додатних значень аж до 5 дБ у разі великих обводнених кристалів, орієнтованих переважно в горизонтальній площині. Утім це малоймовірні комбінації параметрів розсіювачів, які служать в більшій мірі для того, щоб показати теоретичні межі значень досліджуваних параметрів.

2.7. Структурно-аналітична схема методу оцінки інформативних поляриметричних параметрів зон небезпечного обледеніння

Структурно-аналітичну схему методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО показано на рис. 2.39. Як можна бачити з рисунка, наведений у другому розділі цієї роботи метод оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО дозволяє оцінювати основні поляриметричні інформативні параметри відбитого сигналу бортової інформаційної метеорологічної системи, що надає базу для створення методів розпізнавання зон потенційного обледеніння літаків і, таким чином, для підвищення безпеки польотів ПС.

Висновки до другого розділу

1. У другому розділі детально розглянуто умови можливого обледеніння ПС, включаючи комбінації температури, вологості і фазового складу метеорологічних об'єктів, які можуть становити потенційну загрозу під час польоту [46]. Показано, що умови небезпечного обледеніння ПС пов'язані з наявністю переохолоджених крапель води і відсутністю крижаних кристалів.
2. Розроблено математичну модель відбиття поляризованих електромагнітних хвиль від метеорологічних цілей по курсу польоту ПС, що дозволяє розраховувати інформаційні параметри сигналу, відбитого від зони можливого обледеніння за різних кутів сканування радіолокатором.

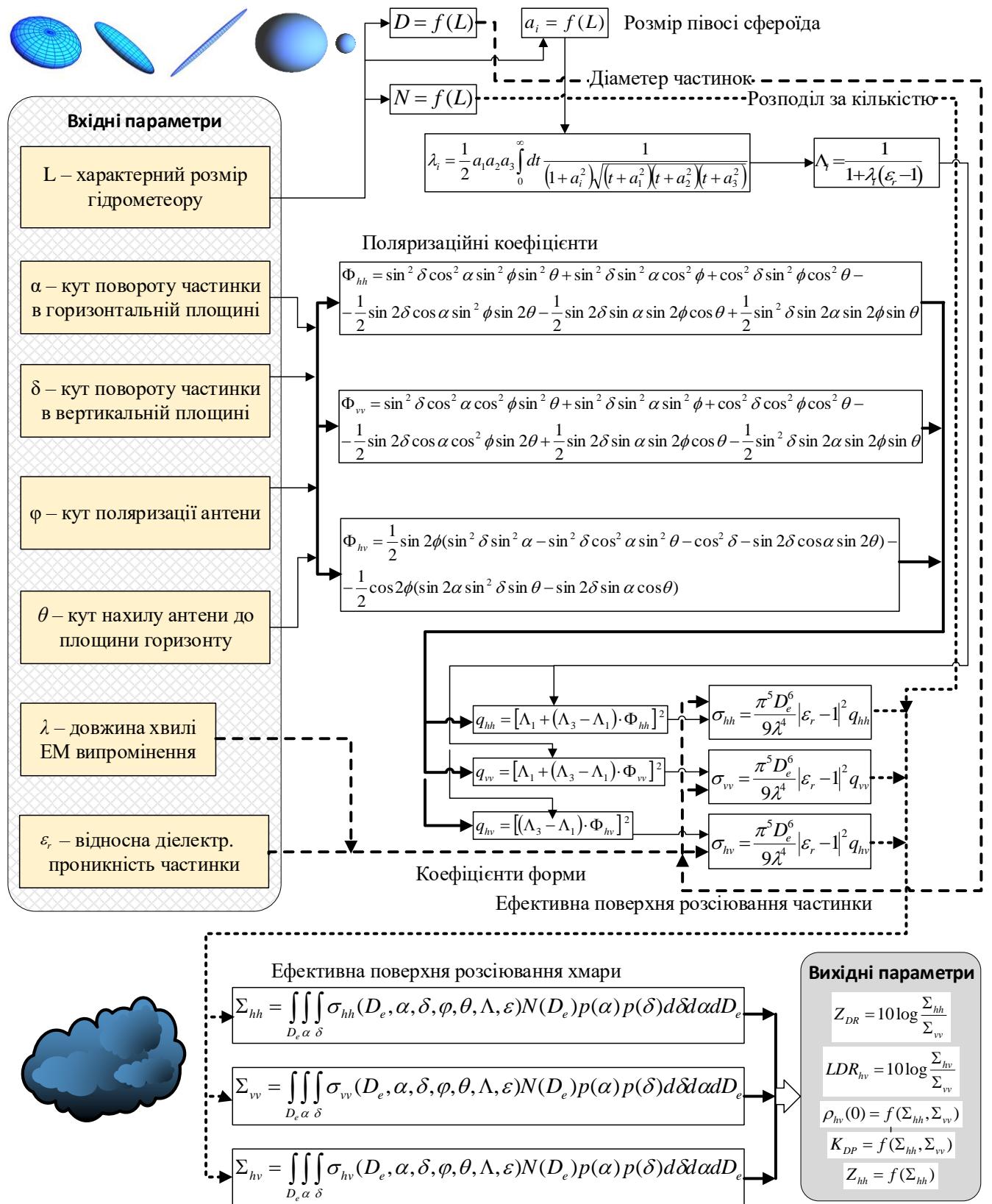


Рис. 2.39. Структурно-аналітична схема методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО

3. Показано граничні межі параметрів відбитого сигналу для різних типів гідрометеорів залежно від характеристик сканувального сигналу радіолокатора і типу метеорологічного утворення (хмари). Існуючи методики, що вирішувати задачу розрахунку відбитого сигналу від сферичних капель дощу, за допомогою розробленої математичної моделі поширене на новий клас об'єктів, – кристали льоду, що дало теоретичну базу для вирішення завдання ідентифікації метеорологічних об'єктів радіолокаційними засобами.

4. На підставі розроблених моделей і виконаних автором розрахунків створено базу даних поляриметричних параметрів відбитих радіолокаційних сигналів для методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО. Сутність методу полягає у визначенні сукупності поляриметричних характеристик відбитого сигналу радіолокатора, які дають змогу ідентифікувати тип гідрометеорів, з яких складається досліджуваний метеорологічний об'єкт.

5. Результати математичного моделювання, отримані у другому розділі дисертації, передбачають подальшу перевірку експериментальними даними.

6. Безпосередній внесок автора полягає у створенні концепції і математичної моделі розрахунку параметрів відбитого радіолокаційного сигналу від хмари несферичних розсіювачів за допомогою апроксимації їх форми сфeroїдами обертання і використанням модифікованих формул Релея, які попередньо використовувались у відомому способі винятково для випадку сферичних розсіювачів.

Матеріали даного розділу відображені в таких публікаціях автора: [12, 13, 24, 28], та деяких інших працях.

Список використаних джерел у другому розділі

64. Niemeijer R.J. Multipolarization FM-CW Doppler radar signal processing for nondistributted targets / Niemeijer R.J., van Sinttruyen J.S., Ligthart L.P. // IEE Proceedings-F, Vol. 138, No.3, June 1991, PP 185-191.

65. Unal C.M.H., Moisseev D.N., Yanovsky F.J., Russchenberg H.W.J. Radar Doppler polarimetry applied to precipitation measurements: introduction of the spectral differential reflectivity. / Unal C.M.H., Moisseev D.N., Yanovsky F.J., Russchenberg H.W.J. // 30th

International Conf. on Radar Meteorology, Munich, Germany: American Meteorological Society, 2001. PP. 316 – 318.

66. Pruppacher H. R. Microphysics of Clouds and Precipitation / H. R. Pruppacher, J. D. Klett. // – 2nd ed. – Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1997. – 954 P.
67. Snow crystals [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://www.snowcrystals.com/>.
68. Kobayashi T. The growth of snow crystals at low supersaturations / T. Kobayashi // Phil. Mag. – 1961. – 6, Iss. 71. – P. 1363–1370.
69. Auer A. H. The dimension of ice crystals in natural clouds / A.H. Auer, D. L. Veal // J. Atmos. Sci. – 1970. – 27, N6. – P. 919–926.
70. Hobbs P. V. The Dimensions and Aggregation of Ice Crystals in Natural Clouds / P. V. Hobbs, S. Chang, J. D. Locatelli // J. Geoph. Res. – 1974. – 79, N 15. – P. 2199–2206;
71. Gunn K. L. S. The distribution with size aggregate of snowflakes / K. L. S. Gunn, J. S. Marshall // J. Met. – 1958. – 15, N 5. – P. 452–461.
72. Абшаев М. Т. Исследования микроструктуры снегопадов / М. Т. Абшаев, Ю. А. Дадали, С. М. Сижажев // Труды ВГИ. – 1971. – Вып. 19. – С. 49–56.
73. Литвинов И. В. Опыт изучения распределения частиц снегопадов по величине / И. В. Литвинов // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1959. – № 10. – С. 22–27.
74. Magono C. Aerodynamic study of falling snowflakes / C. Magono, T. Nakamura // J. Meteor. Soc. Japan. – 1965. – 43. – P. 139–143.
75. Harimaya T. Characteristics of snowflake size distributions connected with the difference of formation mechanism / T. Harimaya, H. Ishida, K. Muramoto // J. Meteor. Soc. Japan. – 2000. – 78. – P. 233–239.
76. Senn P. In-situ observations and modeling of aggregation of snowfall / P. Senn, E. Barthazy // Proc. Europ. Conf. on Radar Meteorology (ERAD-2004). – Visby, 2004. – P. 253–256.
77. Gunn K. L. S. The distribution with size of aggregate snow- flakes / K. L. S. Gunn, J. S. Marshall // J. Meteorol. – 1958. – 15. – P. 452–461.

78. Есюнин Д. Равномерное распределение случайных точек на простейших геометрических фигурах. ПМ-99 2003, [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://armgeo1.narod.ru/files/rndpnt.pdf>.
79. Davis. PhD. Thesis, Depart. Environ. Sciences, Univ. of Wyoming, Laramie, Wyoming. – 1974
80. Heymsfield A. J. Ice crystal terminal velocities / A. J. Heymsfield // J. Atmos. Sci. – 1972. – 29, N 7. – P. 1348–1357.
81. Айвазян Г.М. Распространение миллиметровых и субмиллиметровых волн в облаках. / Справочник под общей редакцией Г.Г. Щукина. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. – 480 С.
82. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. Радио, 1970. – 408 С.
83. Hallikainen M. Measurements of the dielectric properties of snow in the 4–18 GHz frequency range / M. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. Abdel-Razik // 12th Eur. Microwave Conf. Proc. – Kent: Microwave Exhibitions and Publ. Ltd., 1982. – P. 151–156.
84. Ambach W. The dielectric behavior of snow: A study versus liquid water content / W. Ambach, A. Denoth // NASA Work- shop on the Microwave Remote Sensing of Snowpack Properties. – Ft. Collins, CO, NASA CP-2153, 1980. – P. 69.
85. Ван-де-Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван-де-Хюлст; пер. с англ. под ред. В. В. Соболева. – М.: Изд. иностр. лит. – 1961. – 536 С.
86. Nakaya U. Snow crystals: Natural and artificial / U. Nakaya. – 1st ed. – Harvard Univ. Press, 1954. – 510 P.
87. Klaassen W. Radar observations and simulation of the melting layer of precipitation / W. Klassen // J. Atmos. Sci. – 1988. – 45, N 24. – P. 3741–3753.
88. Matsuo T. Melting of snowflakes below freezing level in the atmosphere / T. Matsuo, Y. Sasyo // J. Meteorological Society of Japan. – 1981 .–59, N1. – P.10–24.
89. Gerhardt J. R. Experimental determinations of the backscattering cross-sections of water drops and of wet and dry ice spheres at 3.2 centimeters / Gerhardt J. R., Tolbert C. W., Brunstein S. A., Bahn W. W. // J. Meteorol. – 1961. – 18. – P. 340–347.

90. Allan L. E. Measurements of the backscatter matrix of dielectric spheroids / L. E. Allan, G. C. McCormick // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1978. – AP-26, Iss. 4. – P. 579–587.
91. Allan L. E. Measurements of the backscatter matrix of dielectric bodies / L. E. Allan, G. C. McCormick // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1980. – AP-28, Iss. 2. – P. 166–169.
92. Denoth A. A comparative study of instruments for measuring the liquid water content of snow / Denoth A., Foglar A., Weiland P. et al. // J. Appl. Phys. – 1984. – 57, N 7. – P. 2154– 2160.
93. Sekhon R. S. Snow size spectra and radar reflectivity / R. S. Sekhon, R. C. Srivastava // J. Atmos. Sci. – 1970. – 27, Iss. 2. – P. 299–307.

Список публікацій здобувача за матеріалами другого розділу

94. Microwave scattering from particles in turbulent atmosphere and its application for hydrometeor type recognition and turbulence detection / Yanovsky F.J., Marchuk V.V., Ostrovsky Ya.P., Pitertsev A.A., Khraisat Ya.S.H., Ligthart L.P. // Вісник Інженерної академії України. – 2007. – № 3-4. – С. 16-23.

Особистий внесок здобувача: наведено опис математичної моделі для розрахунку параметрів відбитого від гідрометеорів сигналу.

95. The Analytical Method of Polarimetric Variables Prediction in The Case of Remote Sensing of Ice Crystals Clouds / Pitertsev A.A. // Journal “Electronics and Control Systems”. К.: НАУ. – 2017. – №51. С. 24-29.

Особистий внесок здобувача: наведено опис аналітичного методу оцінювання значень поляриметричних інформативних параметрів відбитого сигналу.

96. Pitertsev A.A. Refined Models and Numerical Simulation of Polarimetric Radar Signals Scattered by Various Types of Hydrometeors / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // Proceedings of 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop (RMSW-2016). – К.: 2016. – С. 48-49 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено опис уточненої математичної моделі відбиття сигналів радіолокатора від гідрометеорів різних типів.

97. Yanovsky F.J. Inverse Scattering and Radar Cross Section of Heterogeneous Hydrometeor Ensemble / Yanovsky F.J., Marchuk V.V., Ostrovsky Y.P., Pitertsev A.A.,

Lighthart L.P. // Proceedings 2nd European Conference on Antennas and Propagation. CD ROM: ISBN 9780863418426. – Единбург, Великобританія: 2007. – С. 1-5 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено опис математичної моделі відбиття сигналів радіолокатора від суміші гідрометеорів одночасно.

98. Pitertsev A. Simulation of Microwave Backscattering on Hydrometeors / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proc. Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. – Vol.2. – Krakiv, Польща: 2006. – С. 499-502 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено опис статистичного моделювання відбиття сигналів радіолокатора від суміші гідрометеорів з використанням програмного середовища Simulink.

99. Lawama A. Microwave Propagation through the Mixed Ensemble of Hydrometeors: Effect of Back Scattering / Lawama A., Pitertsev A., Yanovsky F. // Book of Abstracts European Microwave Week, EuMC 2005. – Париж, Франція: 4-6 жовтня 2005. – С. 155.

Особистий внесок здобувача: наведено опис математичної моделі поширення електромагнітних хвиль через суміші гідрометеорів різних типів.

100. Yanovsky F. Aircraft Icing Prevention Radar System: Models and Software for Calculation of Information Parameters. / Yanovsky F. Pitertsev A., Sidorenko T. // Proc. of International Radar Symposium IRS-2005. – Берлін, Німеччина: 2005. – С. 489-492 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено опис моделювання відбиття сигналів радіолокатора від гідрометеорів з використанням програмного середовища MatLab, яке було проведено для підтвердження можливості визначення ЗНО.

101. Pitertsev A. Mathematical Modeling and Simulation of Backscattering from Hydrometeors of Different Types. / Pitertsev A., Yanovsky F. // Conference Proceedings. 10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – Д.: 14-17 вересня 2004. – С. 292-294 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено опис моделювання відбиття сигналів радіолокатора від гідрометеорів для визначення особливостей структури відбитого сигналу на різних поляризаціях.

РОЗДІЛ 3

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ ЗА ДОПОМОГОЮ БОРТОВОЇ МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Характеристика умов отримання експериментальних даних

3.1.1. Загальні відомості про джерела експериментальних даних

Для визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи теоретичні розрахунки, що було наведені у розділі 2, мають бути перевірені за допомогою експериментальних даних. У роботі опрацьовано і проаналізовано експериментальні дані, отримані під час виконання ряду незалежних вимірювань, виконаних у різних умовах. Основними джерелами вихідних експериментальних даних були дослідження хмар і опадів, виконані в Нідерландах у Міжнародному дослідницькому центрі радіолокації (*International Research Centre for Telecommunications and Radar – IRCTR*) при Делфтському технічному університеті (*TU-Delft*) із залученням такої технічної бази [4]:

- протягом 1996–2001 років за допомогою поляриметричних радіолокаторів DARR і TARA [51], що працюють в S-діапазоні (несна частота 3.315 ГГц) [97] в рамках договору про співпрацю між НАУ та TU-Delf;
- протягом 2008–2014 рр. за допомогою поляриметричного радіолокатора зі швидким перелаштуванням поляризації і високою роздільною здатністю PARSAХ, що працює у S- і X-діапазоні (3,315 ГГц і 9,6...10 ГГц). Локатор працює за принципом безперервного випромінювання з частотною модуляцією і має два незалежні ортогональні поляризаційні канали вимірювання [98].

У праці [4] наведено результати вимірювань метеорологічних об'єктів, які опубліковано в літературі, за допомогою поляриметричних радіолокаторів. Зокрема, отримані в Росії в Центральній аерологічній обсерваторії (ЦАО) в різний час, у тому числі, за допомогою бортового поляриметричного радіолокатора, розробленого спільно фахівцями ЦАО, НАУ і Київського НДІ «Буран» [62, 63].

3.1.2. Коротка характеристика апаратури

Основні технічні параметри радіолокаційних систем, за допомогою яких були отримані експериментальні дані *розділу 3* цієї роботи, наведені нижче [3]:

Дельфтський атмосферний дослідний радіолокатор [51] DARR (*Delft Atmospheric Research Radar*) розроблений і виготовлений в *International Research Centre for Telecommunications and Radar* у 80-і роки. Він є доплерівсько-поляризаційною радіолокаційною системою безперервного випромінювання із частотною модуляцією. Робоча частота – 3,315 ГГц. Система має дві параболічні антени: передавальну діаметром 4,28 м і приймальну діаметром 2,12 м. Еквівалентна ширина основного пелюстка для двох антен $1,7^\circ$. Поляризація лінійна. Є можливість електронного керування кутом поляризації на передавання і приймання (32 дискретні значення кута поляризації) в кожному періоді модуляції. Якщо X і Y – одна з 32 можливих комбінацій ортогональних кутів лінійної поляризації, то при зондуванні метеорологічного утворення вимірюються три первинні поляризаційні сигнали (XX, YY, XY), де перший індекс позначає поляризацію на приймання, а другий – на передавання. Це дозволяє вимірювати диференціальну відбиваність Z_{DR} (формула (2.20)) і лінійне деполяризаційне відношення LDR_{hv} (формули (2.21), (2.22)). Рівень сигналу перехресної поляризації системи за променем в середньому не більший ніж -30 дБ. Рівень першого бічного пелюстка не більший за -24 дБ на передавання і -20 дБ на приймання. Дальня зона починається з відстані 400 м. Динамічний діапазон становить 90 дБ.

Система DARR є дуже гнучкою щодо незалежного перелаштування своїх параметрів у широких межах з цифровим комп'ютерним керуванням. Так, потужність, яка випромінюється, може встановлюватися від одиниць до двохсот ват (у безперервному режимі випромінювання). Девіація частоти ΔF змінюється від 1 до 50 МГц, що забезпечує установлення необхідної роздільної здатності за дальністю, наприклад, 150 м при $\Delta F = 1$ МГц, або 15 м при $\Delta F = 10$ МГц, або 3 м при $\Delta F = 50$ МГц. Похибка вимірювання відбиваності Z становить не більше 1 дБ, похибки вимірювання Z_{DR} і LDR_{hv} 0,1 дБ і менше 1 дБ відповідно. За допомогою

комп'ютерної системи керування обидві антени синхронно можуть займати необхідне положення в просторі в межах 360° по азимуту і $0\dots90^\circ$ по куту місця, однак вимірювання проводяться при нерухомому промені. Систему DARR установлено стаціонарно на даху 23-поверхової будівлі (єдиного висотного будинку в цьому районі) в 15 км від узбережжя Північного моря.

Пересувний атмосферний радіолокатор TARA [96] (*Transportable Atmospheric RAdar*) розроблений і виготовлений в IRCTR у період 1995–1999 pp [65]. Він зберігає всі переваги радіолокатора DARR, але є більш досконалою системою.

Система TARA сконструйована в стандартному контейнері довжиною 12 м і в основному використовується для дослідження хмар і опадів. Висока гнучкість щодо таких параметрів, як роздільна здатність і чутливість дозволяють застосовувати TARA для визначення таких характеристик гідрометеорів, як розміри, форма, просторова орієнтація і термодинамічний стан. Установка антени радіолокатора може змінюватися для транспортування та інших потреб, зокрема, зондування атмосфери. Для розв'язки на передавання і приймання TARA має дві дзеркальні параболічні антени з трьома зонами випромінювання у кожній. Невеликі випромінювачі перебувають поза фокусом антени для генерації променів, відхилених на 15° у двох ортогональних напрямках. Ці зони випромінюють лінійно поляризовані коливання і використовуються спільно з фокальним променем для отримання тривимірних характеристик вітру. Електромагнітне випромінювання у фокальній зоні має одну з двох ортогональних лінійних поляризацій, а дві антени керуються незалежно, що дозволяє вимірювати повну матрицю зворотного розсіювання. Радіолокатор має роздільні передавач і приймач, тому повну матрицю зворотного розсіювання можна отримати послідовно за 4 періоди модуляції. Передавач є твердотільним з максимальною потужністю 100 Вт. Приймач радіолокатора має досить низький рівень шуму. Роздільна здатність радіолокатора може змінюватися у широкому діапазоні значень. Дані в реальному часі обробляються на виділеній комп'ютерній системі, що заснована на семи швидкодіючих сигнальних процесорах і чотирьох мікросхемах FFT (*Fast Fourier Transform*). Дані оцифровуються у 16-ти розрядний

код із швидкістю 1 МГц. Система дозволяє обчислювати 512 відліків за дальностю і 512 відліків за допплерівською частотою з періодом вимірювання в 1 мс.

Система TARA змонтована на платформі трейлера і може бути переміщена в будь-яку географічну позицію з оперативним розгортанням протягом декількох хвилин. У цій роботі використано дані поляриметричного зондування хмар і опадів, яке проводилось в рамках міжнародної дослідницької програми в 2001 р. у районі Кабау у центральній частині Нідерландів на полігоні Королівського метеорологічного інституту.

Поляриметричний двоканальний радіолокатор з можливістю швидкого перелаштування S- і X-діапазонів PARSAх (*Polarimetric Agile Radar in S- And X-band*) був розроблений як поляриметричний локатор для метеорологічних цілей, який може вимірювати рухомі об'єкти з високою роздільною здатністю в діапазоні відстаней 0...15 км [98, 99]. Цей радар випромінює два різні сигнали, які оцифровуються і обробляються після відбиття. У процесі розроблення і використання поляриметричних радіолокаторів дослідники і вчені зрозуміли, що можливість отримувати повну поляризаційну характеристику цілі щонайменше за два такти вимірювань привносить неминучі спотворення у вимірювані дані. Попередники PARSAх працювали за такою схемою: випромінювали, наприклад, горизонтально поляризований сигнал, вимірювали відгук цілі на кожній з поляризацій а також кросполяризаційну складову, потім міняли поляризацію випромінюваного сигналу на вертикальну і повторювали все спочатку. За час перемикання радіолокатора між поляризаціями характеристики цілі неминуче змінювалися, особливо помітно це для таких динамічних об'єктів, як гідрометеори (краплі, кристали льоду і снігу). Ці спотворення могли призводити до втрати точності вимірювань і невідповідностям між теоретичними моделями і практичними вимірами. Існує відоме вирішення цієї проблеми – використовувати сигнали з подвійною ортогональністю. Це означає, що скалярний добуток таких сигналів у часовій та просторовій областях дорівнюватиме нулю. Такий тип зондувальних сигналів надає унікальну можливість розділити всі елементи матриці розсіювання і виміряти кожен з них одночасно протягом лише одного імпульсу локатора (одного періоду сканування).

Тому зроблено спробу створити систему, здатну вимірювати відгуки за обома ортогональними поляризаціями одночасно [99]. Завдяки можливості одночасно вимірювати матриці зворотного розсіювання радіолокаційних цілей на двох ортогональних поляризаціях забезпечується набагато вища просторова роздільна здатність по цілях, ніж у його попередників. Чотири елементи матриці зворотного розсіювання отримуються одночасно шляхом співвіднесення сигналу на кожному поляризаційному каналі з обома ортогональними сигналами передавача. Одночасне оброблення на обох поляризаціях можливе завдяки використанню ортогональних у тимчасовій області імпульсів передавача, які формуються з використанням шумоподібних М-послідовностей і технології кодового розділення сигналів. Тривалість одного такого імпульсу дорівнює 20 нс. Роздільна здатність PARSAХ за дальністю для вимірювань близько розташованих цілей становить близько 3 м. Це розширяє смугу сигналу близько до 50 МГц. Завдяки високій роздільній здатності така система придатна для вивчення дрібних частинок, таких як краплі води в хмарах. Система PARSAХ є наступником DARR і розташована на даху факультету електротехніки, математики та інформатики будинку Технічного університету Делфта [99]. Детальні технічні характеристики даного локатора наведено в табл. 3.1:

Таблиця 3.1

Параметри S-діапазону	Центральна частота 3,315 ГГц. Ширина смуги модуляції 2...50 МГц. Роздільна здатність 75...3 м. Період розгортки 1 мс.
Антени	Дві параболічних антени рефлекторного типу. Розв'язка приймач / передавач 100 дБ.
Приймальна антена	Діаметр 2,12 м. Ширина ДН 4,6°. Коефіцієнт підсилення антени: 32,75 дБ.
Передавальна антена	Діаметр 4,28 м. Ширина ДС (діаграми спрямованості) 1.8°.

продовження Таблиці 3.1

	Коефіцієнт посилення антени 40,0 дБ.
Передавач	Твердотільний передавач максимальною потужністю 100 Вт на канал. 80 дБ атенюатори (8 біт керувальна шина)
Приймач	Динамічний діапазон: краще ніж 70 дБ SFDR (<i>Spurious-Free Dynamic Range</i> – безрозмірна величина, що дорівнює відношенню потужності корисного вузькосмугового сигналу (несної) до потужності найбільш потужної паразитної частотної складової (гармоніки)). Зниження частоти з перетворенням у проміжну частоту 125 МГц (частота дискретизації 400 МГц, 14 біт). 4 канальний процесор обробки сигналів на основі FPGA.
<i>Форма сигналів</i>	Цифровий генератор вектору форми сигналу (частота дискретизації до 1.2 ГГц, 14 біт) Лінійна частотна модуляція PCM з ортогональними кодами

Радіолокаційний поляриметр 3–сантиметрового діапазону [62, 63]. На відміну від радіолокаторів DARR, TARA, і PARSAX, які є когерентними системами, радіолокаційний поляриметр є некогерентним метеорологічним радіолокатором. Він був розроблений і виготовлений фахівцями ЦАО і Молдавської служби з активного впливу на гідрометеорологічні процеси [3, 63, 66].

До складу вимірювального комплексу входять: двоканальний поляризаційний радіолокатор, виготовлений на базі імпульсної РЛС АРС-3М, пристрій сполучення РЛС-ЕОМ і мікро-ЕОМ з необхідним набором периферійних пристрій. Функціональну схему поляризаційного вимірювального комплексу показано на рис. 3.1 [4]:

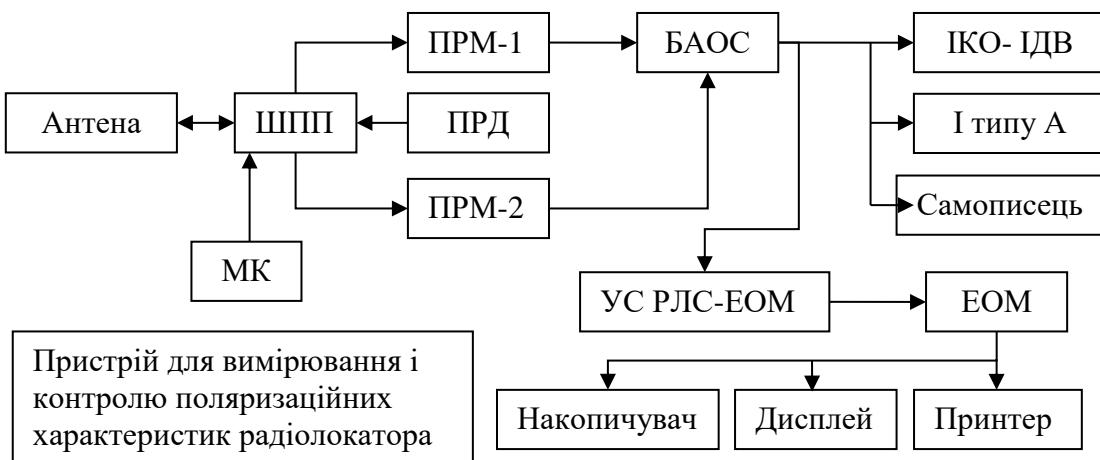


Рис. 3.1. Функціональна схема вимірювального комплексу (поляриметра)

Передавач (ПРД) генерує імпульси електромагнітних коливань частотою 10 ГГц тривалістю 2 мкс і частотою повторення імпульсів 400 Гц. Площа поляризації зондувальної хвилі задається швидкодійним перемикачем поляризації (ШПП), який після випромінення імпульсу і закінчення часу приймання (100 км за дальністю) під керуванням модуля керування (МК) ШПП повертає випромінювання (приймання) на 90° . Таким чином, по черзі (з частотою повторення зондувальних імпульсів) випромінюються хвилі з вертикальною і горизонтальною лінійною поляризацією. Завдяки двоканальній системі приймання (ПРМ-1 і ПРМ-2) прийнятий від цілі сигнал розкладається на дві ортогональні компоненти, що дозволяє за два періоди повторення зондувальних імпульсів виміряти чотири складові прийнятого сигналу: дві основні (у разі збіжних поляризацій зондувального коливання і прийнятого сигналу) P_{XX} і P_{YY} і дві ортогональні – P_{XY} і P_{YX} . Для зменшення похиби вимірювання компоненти P_{XX} і P_{YY} вимірюються в одному приймальному каналі, а компоненти P_{XY} і P_{YX} – в іншому каналі. Поляризаційна розв'язка між ортогональними каналами не менше 26 дБ. Чутливість приймача $P_{r\min} = -132$ дБ/Вт [62, 63].

Блок аналогового оброблення сигналів (БАОС) дозволяє отримувати відображення радіолуни хмар на індикаторах кругового огляду (ІКО) і дальності–висота (ІДВ), позначених на схемі (ІКО / ІДВ), а також виділяти області підвищеної відбиваності і деполяризації за заданим пороговим рівнем. ІКО / ІДВ використовується для вибору об'єкта спостереження. На двопроменевому індикаторі

типу А (І типу А) можна отримувати амплітудні характеристики вимірюваних поляризаційних складових (в основному при налаштуванні і градуюванні системи). За допомогою контрольно-вимірювального модуля, що входить до складу БАОС, можна вимірювати і фіксувати на стрічці 6-ти канального самописця величини всіх чотирьох складових відбитого сигналу P_{XX} , P_{YY} , P_{XY} і P_{YX} , а також значення лінійного деполяризаційного відношення LDR_{hv} і диференціальної відбиваності Z_{DR} в одному зондувальному стробі, обмеженому ширину ДНА ($1,2^\circ$) і протяжністю 400 м за дальностю. Зондувальний строб може зміщуватись за дальностю в межах 100 км, а його положення фіксується у вигляді мітки на індикаторах ІКО / ІДВ і типу А. Контрольно-вимірювальний модуль із самописцем використовується також для фіксації параметрів контрольного сигналу, випромінюваного пристроєм для вимірювання і контролю поляризаційних характеристик радіолокатора. Це необхідно для вимірювання розв'язки між каналами і ступеня ідентичності приймальних каналів.

Пристрій сполучення ПрС РЛС-ЕОМ забезпечує вимірювання чотирьох складових луна-сигналу в кожному із 32 стробованих обсягів. Точність вимірювання миттєвих значень луна-сигналу становить 0,25 дБ. Довжина кожного стробу становить 400 м, а довжина всієї стробованої «гребінки» – 12,8 км. Залежно від відстані до цілі «гребінку» можна вручну переміщати по дальності до 100 км. Кількість імпульсів осереднення (від 1 до 256 імпульсів) задається оператором перед вимірюванням. Поляриметр дозволяє отримувати вертикальні (в секторі $0...30^\circ$ через 1°) і горизонтальні (в секторі 60° через 2°) перетини поляризаційних параметрів хмар і опадів у зоні стробованої «гребінки». Максимальний час, необхідний для виконання одного радіолокаційного розрізу за ручного керування антеною і осередненні 256 імпульсів становить 50 с. Під час виконання вертикального перетину хмари горизонтальна дальність «гребінки» не змінюється зі зміною кута нахилу антени, тобто вимірювання проводяться у вертикальному стовпці, обмеженому розмірами «гребінки».

Вторинне оброблення поляризаційних даних дозволяє в оперативному режимі отримувати вертикальні та горизонтальні розподіли в хмарарадіолокаційної відбиваності Z і поляризаційних характеристик LDR_{hv} , Z_{DR} та ін. [62, 63].

3.2. Методика експериментів і задача обробки даних [62, 63]

Методика оброблення даних експериментальних вимірювань спрямована на вирішення таких основних завдань:

- перевірка адекватності математичних моделей і поляриметричного підходу до розрахунку поляризаційних характеристик сигналів, відбитих від гідрометеорологічних об'єктів, які були розроблені в *розділі 2*;
- отримання експериментальних даних про розподіли поляриметричних ІП у різних ситуаціях;
- установлення кількісних відмінностей характерних значень поляризаційних параметрів метеорологічного об'єкта за наявності зони небезпечного обледеніння ПС і за відсутності умов обледеніння, які можна використати як априорну інформацію для синтезу алгоритмів локалізації небезпечних для польоту зон.

Третє завдання можна розглядати як окремий випадок другого. Однак з огляду на те, що оцінка розподілів різних ІП навряд чи може бути виконана в повному обсязі за обмеженої кількості експериментів, питання про характерні величини ІП у різних ситуаціях набуває самостійного значення.

Для перевірки адекватності моделей доцільно використовувати дані радіолокаційного зондування хмар і опадів, виконані за допомогою радіолокаторів DARR, TARA і PARSAХ, оскільки ці дані відрізняються високою роздільною здатністю (як за просторовими координатами, так і за швидкістю) і можуть бути використані для оцінювання мікрофізичних і динамічних характеристик гідрометеорологічних об'єктів із наступним порівнянням їх з розрахунками. Методика вимірювань полягала у реєстрації відбитих сигналів і обчисленні поляриметричних параметрів за нерухомого променю радіолокатора. Кут нахилу

променя був або 90° (напрямлений вертикально вгору) або похилий (15° , 30° і 45°) відносно горизонту для TARA.

3.3. Експериментальна перевірка адекватності моделей

Для перевірки адекватності моделей, за якими розраховувалися ДВ Z_{DR} , ЛДВ LDR_{hv} і коефіцієнт кореляції $\rho_{hv}(0)$, зручно скористатися результатами зондування дощу слабкої та помірної інтенсивності за допомогою систем DARR, TARA і PARSAХ. Проблема полягає в тому, що зі зміною кута нахилу антени і дальності луна-сигнали надходять від різних досліджуваних об'ємів, які можуть мати різні поляризаційні властивості. Тому немає жодної впевненості, що зміни викликані, скажімо, змінами кута нахилу антени, а не тим, що інші розсіювачі мають інші поляризаційні властивості. З цієї причини для оброблення були обрано об'єкти, що мають найбільш однорідну структуру у великих обсягах простору – обложні опади. Це дозволяє отримати залежність вимірюваних поляризаційних параметрів як функцій кута нахилу антени.

Алгоритм оброблення даних DARR і TARA, включає такі кроки [51, 97]:

- вимірювання відбиваності Z і поляризаційних характеристик Z_{DR} , LDR_{hv} і $\rho_{hv}(0)$ за заданого значення кута місця θ при зондуванні певного об'єму дощу;
- розрахунок поляризаційних параметрів $Z_{DR}(L, \theta)$ і $LDR_{hv}(L, \theta)$ згідно з моделями, описаними у *розділі 2*, за значень θ і L , що відповідають даним експерименту;
- зіставлення вимірюваних значень поляризаційних параметрів з розрахунками, виконаними за моделями за відповідних умов.

Профілі відбиваності в разі похилого зондування (45°) хмари, що дає опади (обложний дощ із середньою інтенсивністю 2,15 мм/год) при горизонтальній поляризації Z_{hh} і вертикальній поляризації Z_{vv} показано на рис. 3.2 [4].

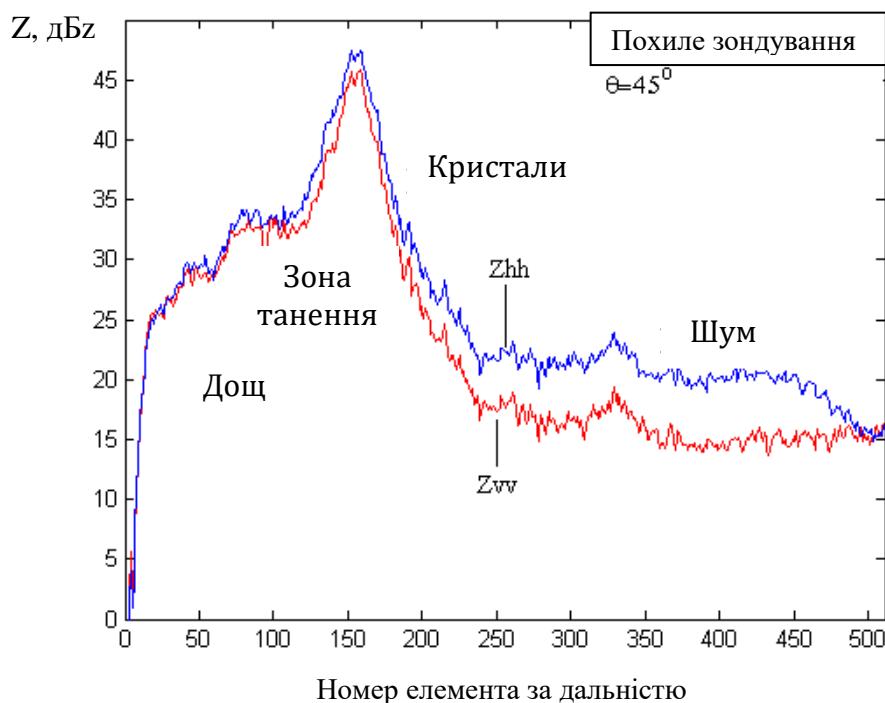


Рис. 3.2. Характерні профілі РВ у разі зондування хмари під час дощу

По осі абсцис відкладено номери елементів дальності. Роздільна здатність радіолокатора (TARA) при цих вимірах була 15 м, отже, наприклад, 50-й елемент дальності розташований на відстані 750 м від радіолокатора [4]. Дальня зона починається приблизно на відстані 250...300 м. Зона дощу простягається приблизно до дальності 1500 м. Різке збільшення відбиваності спостерігається в зоні танення в районі нульової ізотерми (так званої «яскравої смуги»). Вище від зони танення розташовується кристалічна частина хмари.

3.4. Аналіз результатів вимірювання РВ, ДВ і ЛДВ одноканальним радіолокаційним поляриметром

У праці [3] подано результати натурних експериментів, виконаних за допомогою одноканального рухомого стробування. Деякі з цих експериментальних даних наведено нижче. Результати горизонтального зондування рідких опадів (строб пересувався по горизонтальній дальності R) показано на рис. 3.3, де Z – відбиваність, дБз, а Z_{DR} – диференціальна відбиваність, дБ.

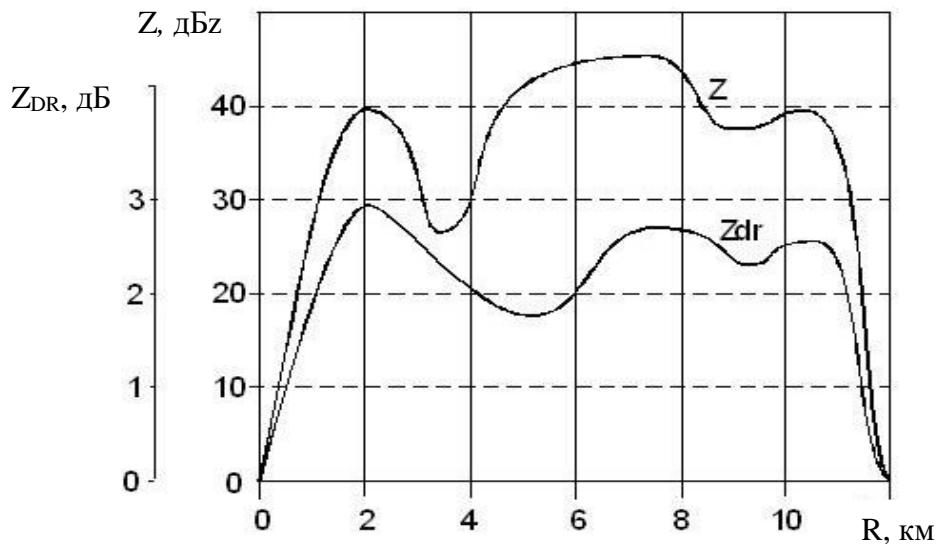


Рис. 3.3. Горизонтальні профілі зондування рідких опадів

Коментуючи цей рисунок з урахуванням результатів теоретичних розрахунків, отриманих у *розділі 2*, можна відзначити таке [4]:

- показник ДВ Z_{DR} набуває додатних значень, отже, гідрометеори орієнтовані переважно горизонтально, що у свою чергу, дозволяє припустити відсутність сильних турбулентних збурень у хмарі;
 - локальні піки відбиваності Z і диференціальної відбиваності, які спостерігаються на висоті 2 км, можуть указувати на наявність зони танення;
 - зниження ДВ і відбиваності Z , що спостерігається на висоті 3...4 км, вказує на верхню межу цієї зони, де танення кристалів ще не почалося;
 - подальше зниження ДВ поряд із збільшенням радіолокаційної відбиваності Z , що спостерігається на висоті 5 км, вище від шару танення, може вказувати на зміни структури кристалічної частини хмари. Імовірно, кількість або розмір кристалів зростає, а орієнтація стає менш упорядкованою. Це може бути спричинено більшою турбулентністю всередині хмари, порівняно з тим, що спостерігалося на висоті 2 км. Велика турбулентність зумовлює до більш рівномірну просторову орієнтацію кристалів в порівняно з переважно горизонтально орієнтованими частинками, які спостерігаються в спокійній атмосфері;
 - крайня межа хмари простягається до висоти 12 км (крайня права частина графіка).
- Результати зондування грозової хмари (строб переміщався по вертикалі)

наведено на рис. 3.4.

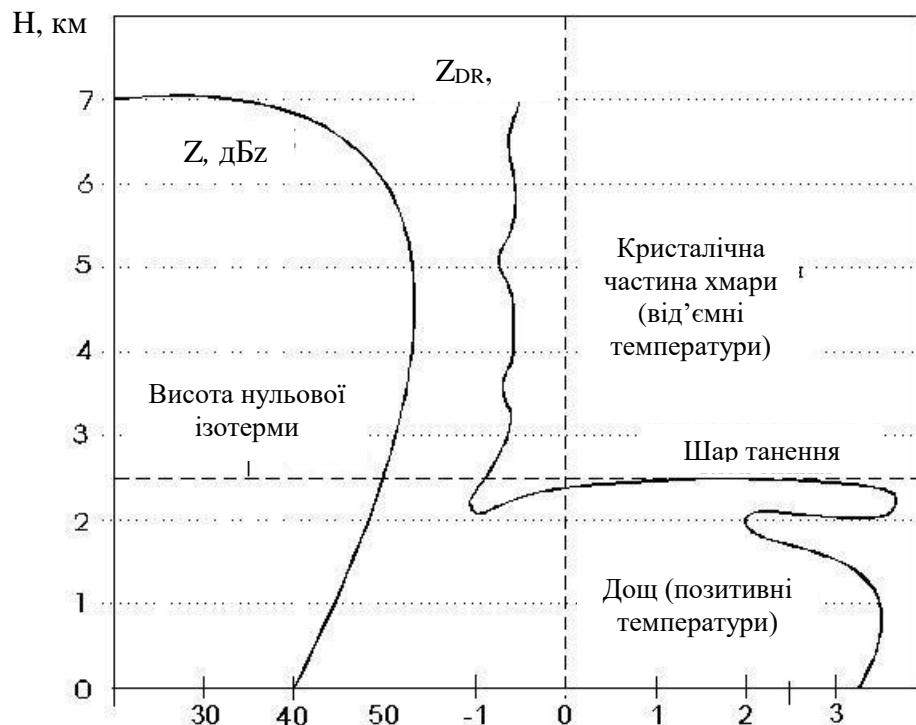


Рис. 3.4. Приклад вертикального зондування грозової хмари [4]

Пунктирна горизонтальна лінія відповідає висоті нульової ізотерми. Ці результати показують, що характерний вертикальний профіль ДВ є надійним індикатором висоти нульової ізотерми.

Коментуючи рис. 3.4 з урахуванням даних теоретичного моделювання *розділу 2*, можна відзначити таке:

- значення ДВ, близькі до трьох, які спостерігаються нижче від зони танення, свідчать про досить сильні поляризаційні властивості частинок у спостережуваній ділянці хмари. Це, в свою чергу, може свідчити про великий розмір крапель, або про наявність обводнених кристалів, орієнтованих переважно горизонтально;
- від'ємні значення ДВ, які спостерігаються у верхній частині кристалічної хмари, свідчать про наявність переважно вертикальної орієнтації частинок, яка може бути викликана сильним електричним полем. Це підтвержує грозовий тип досліджуваної хмари;
- верхня межа кристалічної частини хмари простягається до висоти 7 км, поступово зменшуючи концентрацію кристалів (ослаблення відбиваності Z), але

зберігаючи майже незмінною мікроструктуру частинок і рівень турбулентності.

Динаміку ДВ в часі – строб був нерухомий (вище від нульової ізотерми) показано на рис. 3.5. Очевидно, що ці стрибки зумовлені зміною орієнтації несферичних поляризованих розсіювачів під дією сильного електричного поля.

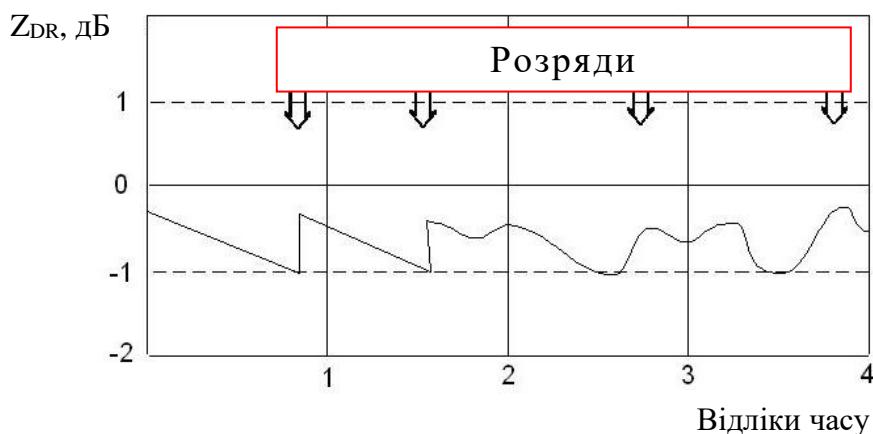


Рис. 3.5. Часова діаграма ДВ під час грози

Від'ємні значення ДВ можуть свідчити про переважно горизонтальну орієнтацію кристалів, яка підтримується електричним полем грозової хмари. Різкі зміни, очевидно, корелюють з грозовими розрядами, моменти яких показані стрілками. Ці розряди зменшують електричну напруженість поля, унаслідок чого частина кристалів прагне зайняти властиве їм без зовнішніх впливів горизонтальне положення. У свою чергу, це призводить до більш хаотичної просторової орієнтації частинок в об'ємі усереднення, при якому ДВ в ідеалі прагне до нуля.

3.5. Аналіз результатів вимірювання РВ, ДВ і ЛДВ радіолокатором TARA

Радіолокатор TARA до появі системи PARSAХ був найбільш потужним і досконалім засобом вимірювання поляриметричних характеристик метеорологічних об'єктів, дані яких були доступні автору цієї дисертації.

Результати вимірювань РВ, ДВ і ЛДВ для хмари, що були виміряні за кута сканування 0° (вертикальне) та 45° (похиле) відносно вертикалі до горизонту, подано на рис. 3.6–3.11.

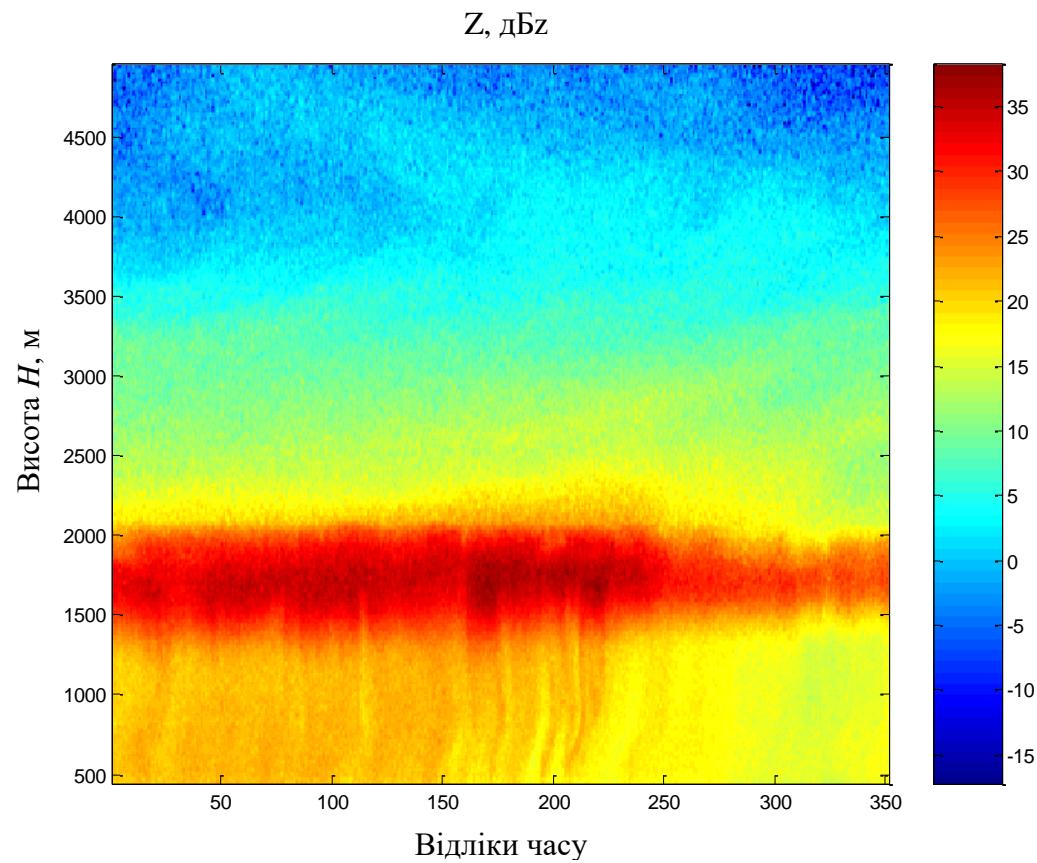


Рис. 3.6. Часова вибірка РВ хмари для різних висот за гориз. сканування, $\theta = 0^{\circ}$

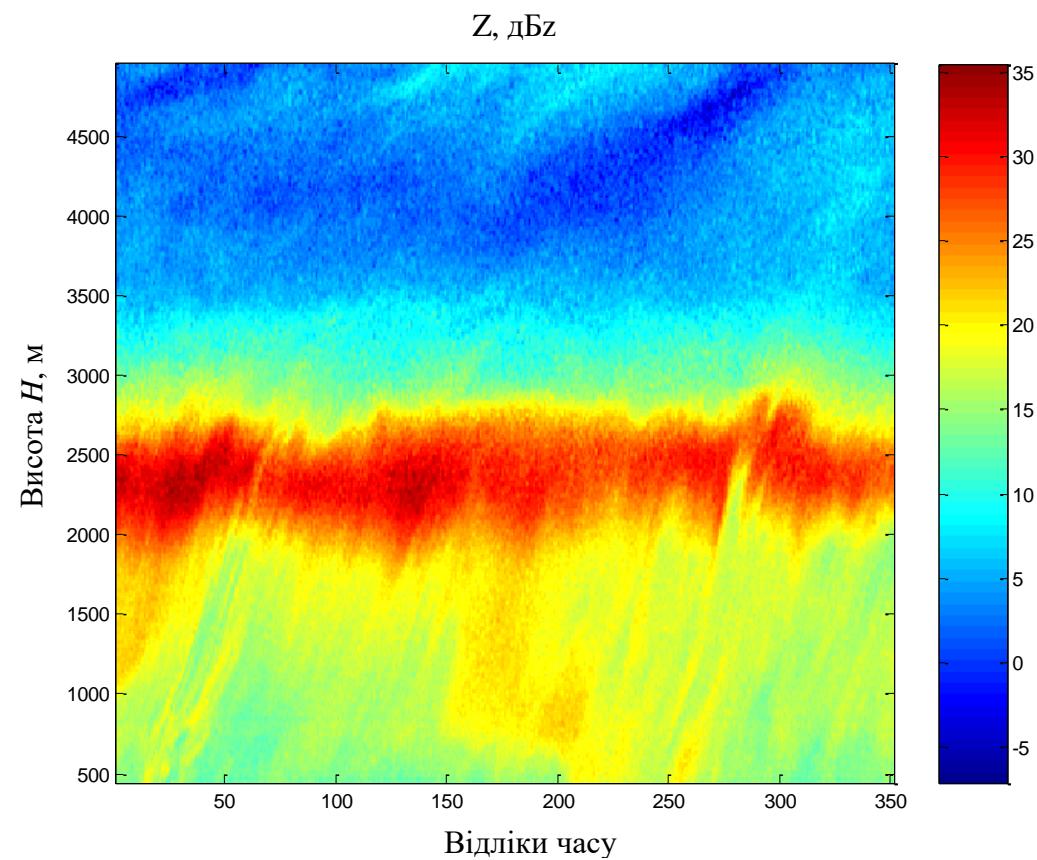


Рис. 3.7. Часова вибірка РВ хмари для різних висот за похилого сканування, $\theta = 45^{\circ}$

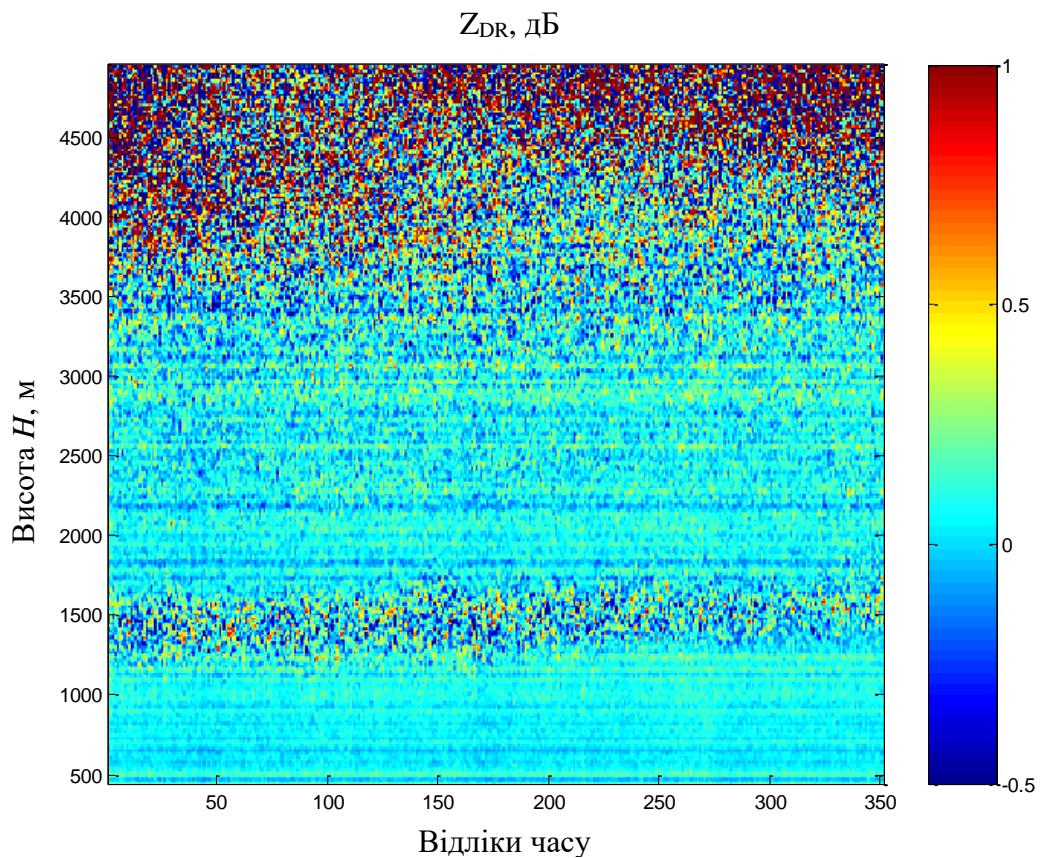


Рис. 3.8. Часова вибірка ДВ хмари для різних висот за вертикал. сканування, $\theta = 0^\circ$

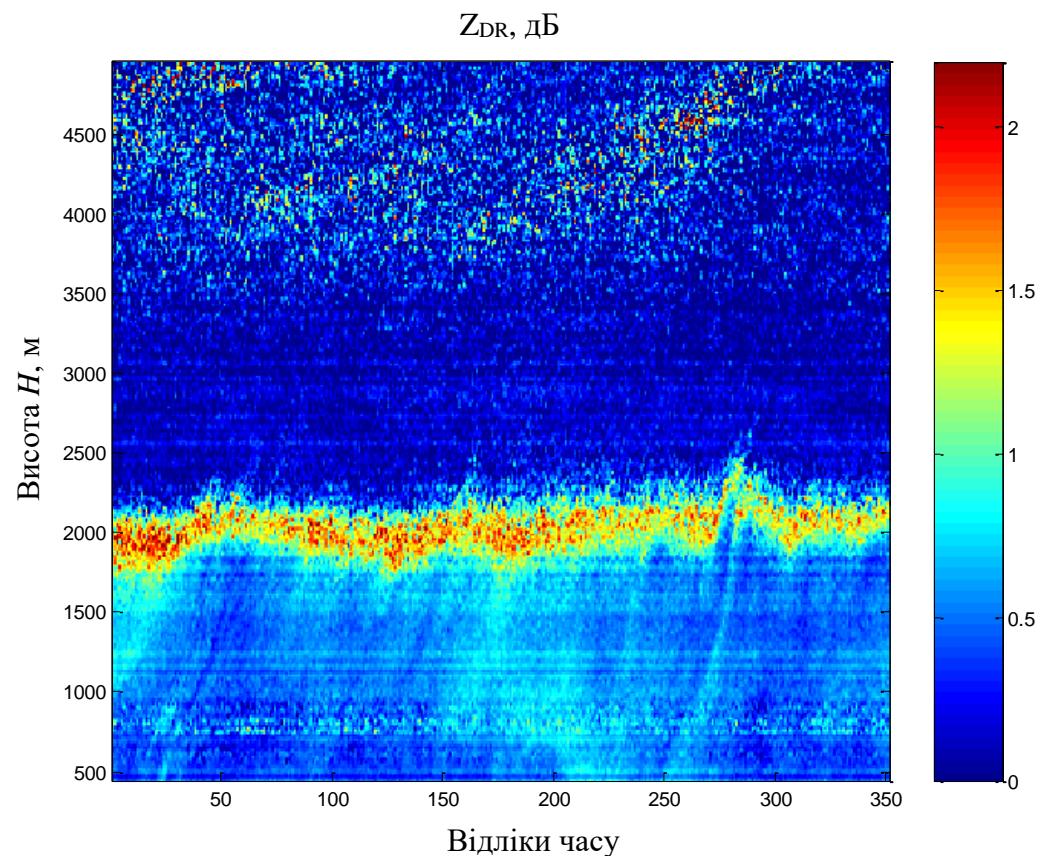


Рис. 3.9. Часова вибірка ДВ хмари для різних висот за похилого сканування, $\theta = 45^\circ$

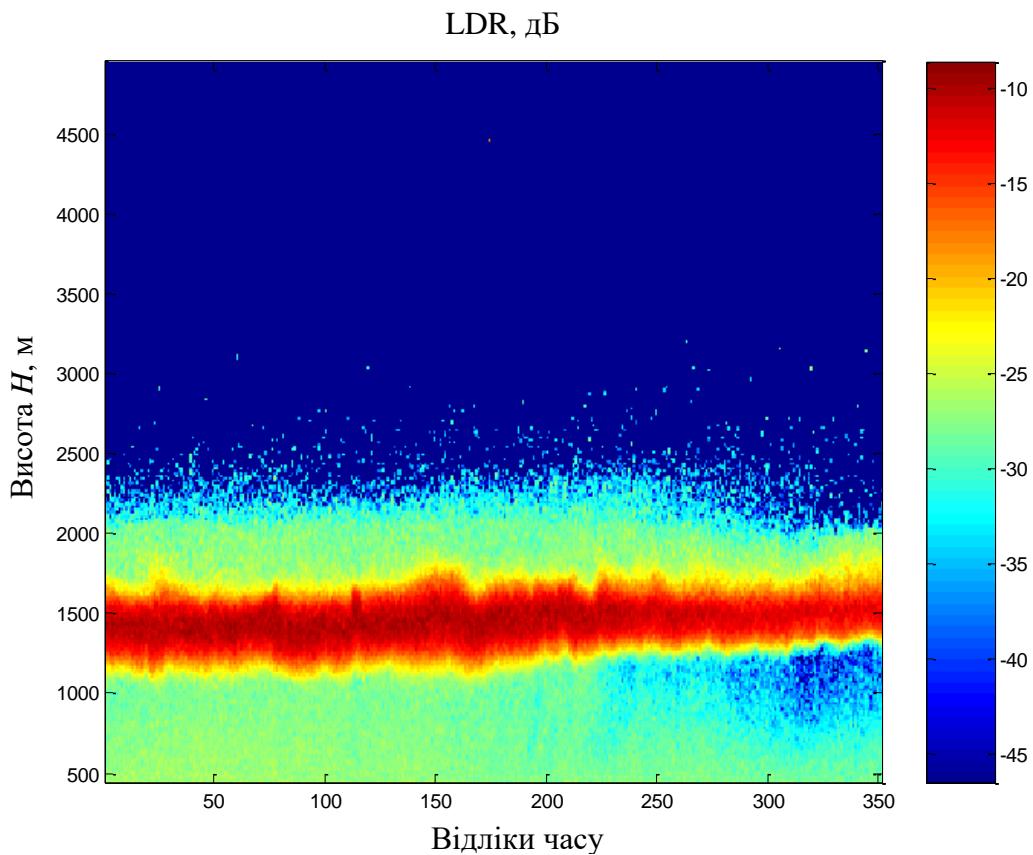


Рис. 3.10. Часова вибірка ЛДВ хмари для різних висот за вертикал. сканування, $\theta = 0^\circ$

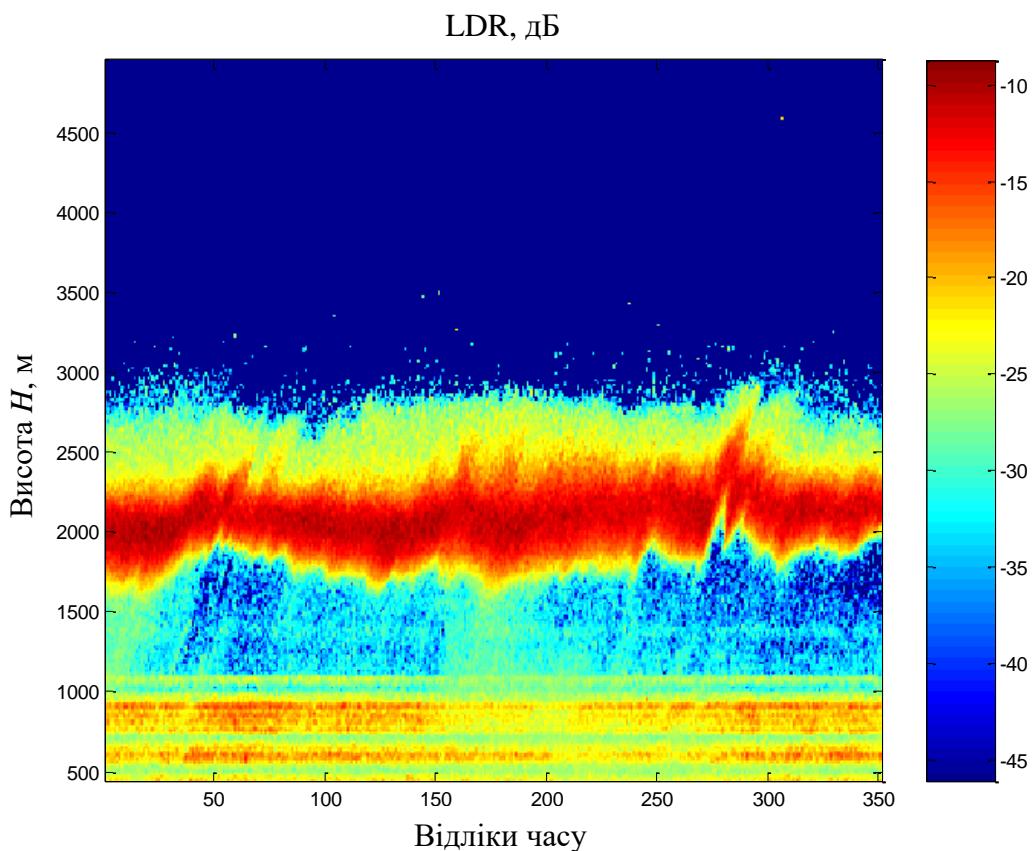


Рис. 3.11. Часова вибірка ЛДВ хмари для різних висот за похил. сканування, $\theta = 45^\circ$

Як можна бачити з рис. 3.6, 3.7 значення радіолокаційної відбиваності Z_H для верхньої частини хмари, яка містить кристали льоду (висота понад 3 000 м) – найслабші і лежать у межах 0...10 dB. Нижня частина хмари, яка відповідає зоні дощу (висота менша за 1 300 м), зумовлює сильніше відбиття до 20...25 dB. І середня частина хмари, що відповідає зоні танення, дає найсильніше відбиття до 35...40 dB, оскільки містить обводнені кристали льоду, що мають одночасно більші геометричні розміри ніж краплі дощу та більші значення діелектричної сталої ϵ ($\epsilon = 81$ для води і $\epsilon = 3$ для льоду). При цьому різниця між значеннями радіолокаційної відбиваності за вертикального та похилого сканування хмари є незначна.

Для параметра ДВ різниця навпаки дуже суттєва. Так, на рис. 3.8 зона танення не виражена чітко, а на рис. 3.9 значення ДВ сягають значень 1,5...2 dB. Детальніше пояснення цьому наведено раніше у *розділі 2* цієї роботи. Вище від зони танення значення ДВ близькі до 0, що може відповідати хаотичному розподілу кристалів льоду у просторі, а нижче від зони танення значення ДВ становлять 0...1 dB, що відповідає дощовим краплям.

Значення параметра ЛДВ також залежать від кута нахилу сканувального променя радіолокатора, але кореляція виражена не так сильно, як у випадку ДВ. Так, вище від зони танення значення ДВ лежать у межах -20...-25 dB, що може свідчити про наявність переважно стовпчастого типу кристалів.

Необхідно зазначити, що результати експериментальних вимірювань TARA дуже добре узгоджуються з результатами моделювання у *розділі 2* цієї роботи.

3.6. Аналіз результатів вимірювання РВ, ДВ, ЛДВ системою PARSAХ

Результати вимірювань РВ, ДВ і ЛДВ для хмари, що були отримані за допомогою системи PARSAХ, подано на рис. 3.12–3.14. На відміну від рис. 3.6–3.11, тут показано перетин хмар у горизонтальній, а не вертикальній площині. Як можна бачити, значення ДВ близькі до 0, а значення ЛДВ у переважній більшості близько -30 dB, що відповідає краплям дощу, але є декілька регіонів з ЛДВ близько -15 dB, що свідчить про наявність кристалів льоду.

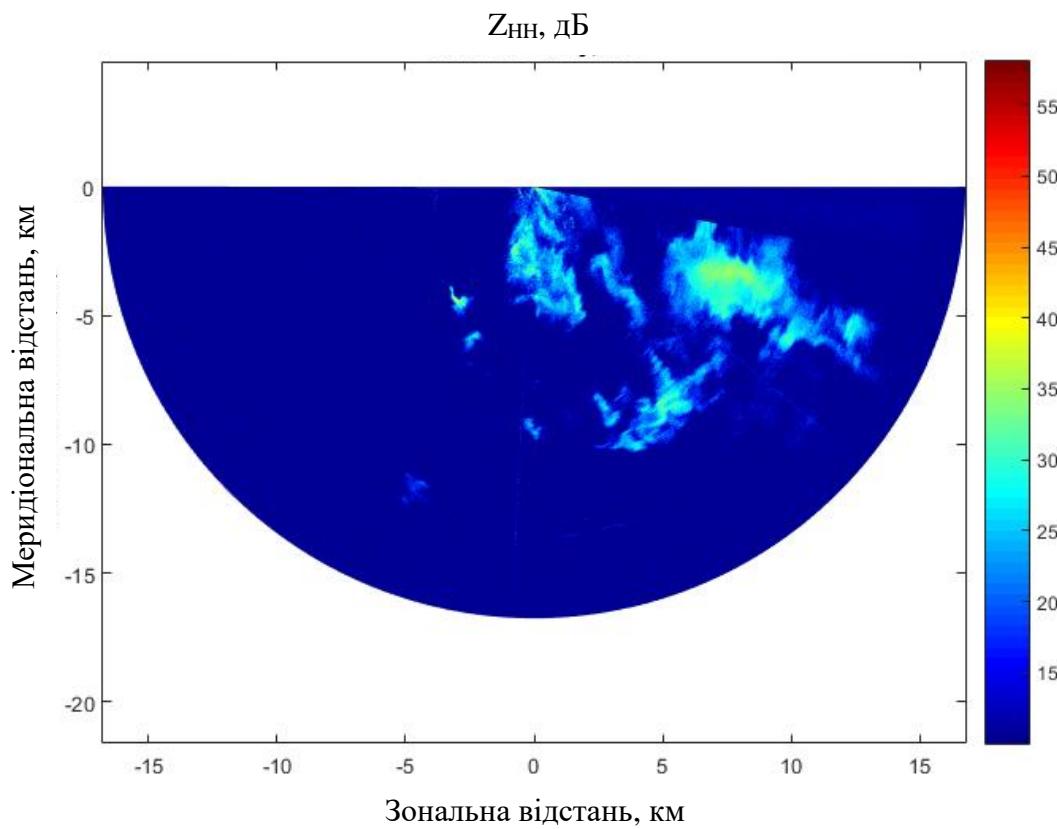


Рис. 3.12. Вибірка РВ хмари для різних кутів за азимутом на горизонтальній поляризації, що містить смугу дощу

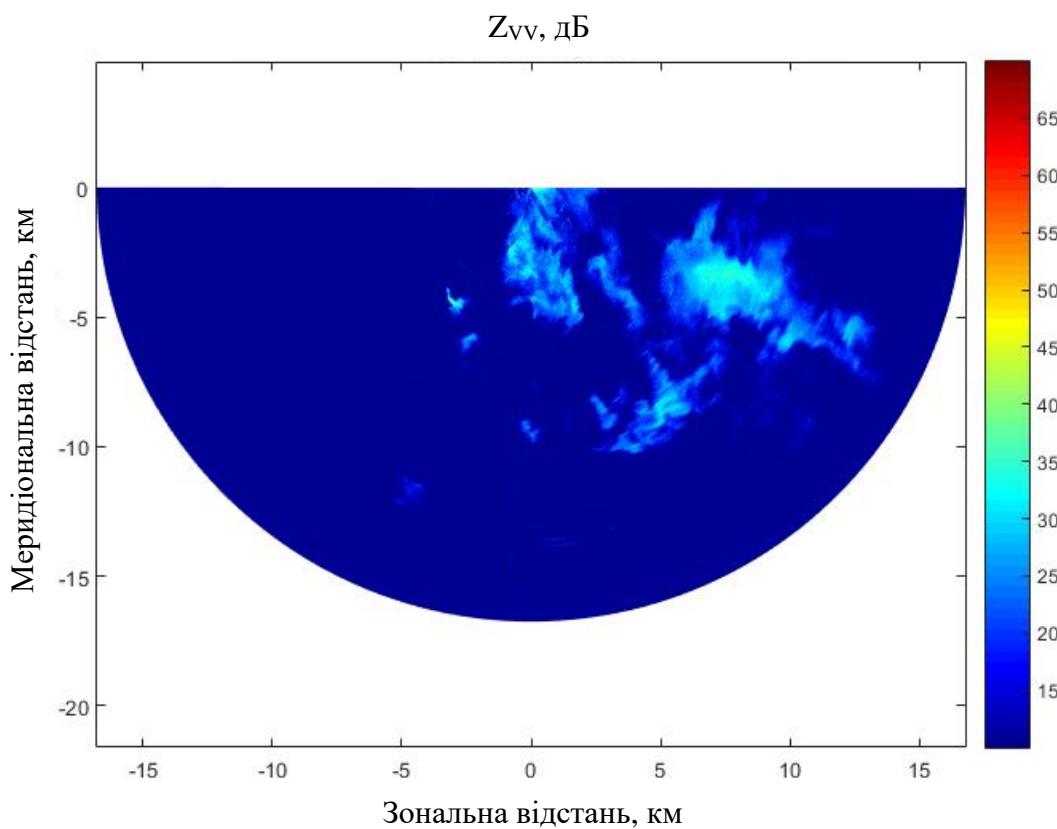


Рис. 3.13. Вибірка РВ хмари для різних кутів за азимутом на вертикальній поляризації, що містить смугу дощу

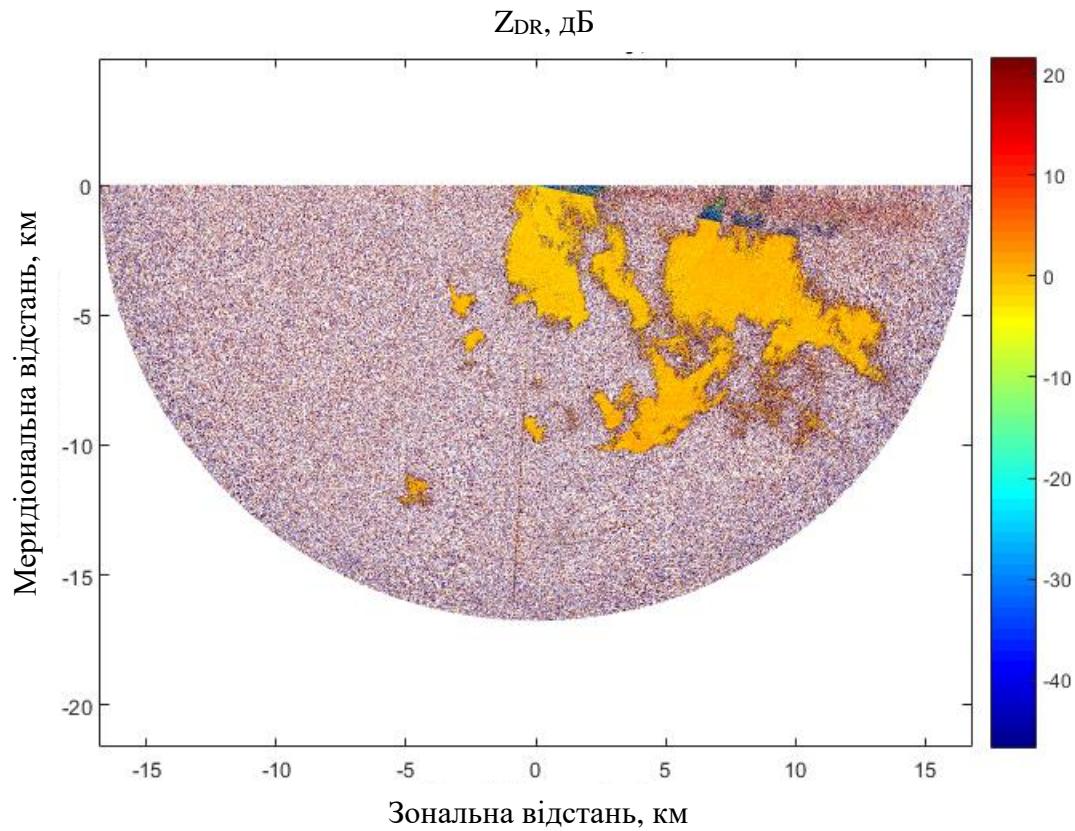


Рис. 3.14. Вибірка ДВ хмари для різних кутів за азимутом, що містить смугу дощу

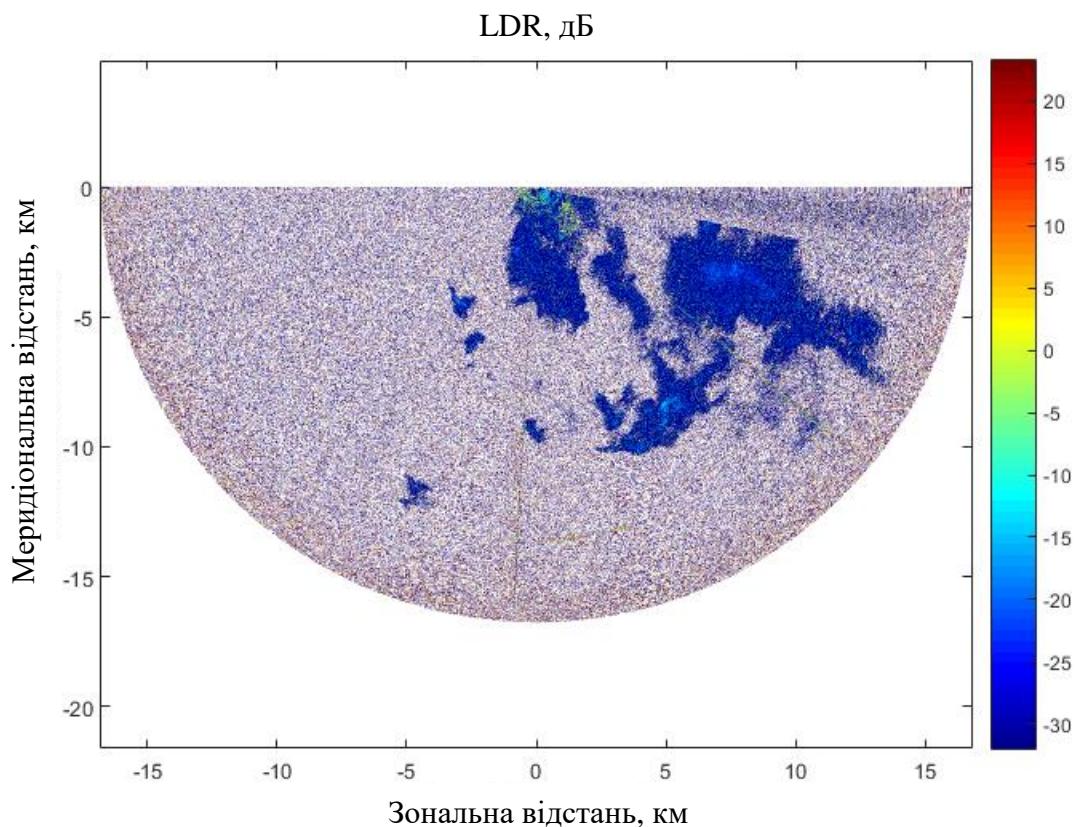


Рис. 3.15. Вибірка ЛДВ хмари для різних кутів за азимутом, що містить смугу дощу.

Необхідно зазначити, що результати експериментальних вимірювань PARSAХ також добре узгоджуються з результатами моделювання відбиття сканувального променя локатора від метеорологічних утворень, які наведено у *розділі 2* цієї роботи.

3.7. Аналіз існуючих алгоритмів виявлення зон небезпечної обледеніння

У попередніх розділах було показано на прикладі теоретичних розрахунків і експериментальних даних, що зворотне розсіювання на несферичних частинках залежить від поляризації зондувального електромагнітного сигналу і фізичних та статистичних параметрів цих частинок [100]. Тому шляхом зміни характеристик радіолокаційних сигналів і відповідного оброблення прийнятого сигналу можна отримати інформацію про форму гідрометеорів [101, 103, 104, 105]. При використанні поляризаційних характеристик відбитого сигналу з'являються додаткові можливості поліпшення якості ідентифікації типу гідрометеорів, а також підвищується точність оцінки інтенсивності опадів.

У *дод. 3* цієї роботи також детально розглянуто сценарії формування зон можливого обледеніння ПС, включаючи найбільш імовірні комбінації гідрометеорів і фізичні аспекти їх формування.

У цьому розділі описуються розроблення і аналіз алгоритмів виявлення або розпізнавання зон небезпечної обледеніння літальних апаратів [106, 107]. Перш за все необхідно відзначити, що на багатьох ПС вже є способи виявлення відкладень льоду під час польоту, наприклад, з використанням радіоізотопних сигналізаторів обледеніння, таких як РІО-3, датчики яких установлюють в повітrozабірниках двигунів. Однак цей спосіб не дає змогу попереджати пілотів ПС заздалегідь, а лише сигналізувати про те, що процес обледеніння вже почався. Через зазначені недоліки автоматичний режим роботи протиобліднювальної системи на практиці може не використовуватися, і система активується в умовах можливого обледеніння, яке прогнозується за повідомленнями рейсових екіпажів і даними синоптиків [49, 102].

Найбільш близьким до пропонованого за технічною суттю є спосіб виявлення зон небезпеки обледеніння ПС за допомогою бортових метеонавігаційних радіолокаторів у режимі виявлення гідрометеоутворень, що полягає у формуванні

голчастої ДН антени, випромінюванні імпульсів електромагнітних коливань (зазвичай з вертикальною поляризацією), прийманні відбитих сигналів (тієї ж поляризації), обробленні сигналів і відображення інформації про щільність хмарного фронту на екрані радіолокатора. Оскільки зони небезпечного обледеніння пов'язані з наявністю хмарності, то місцеположення можливих зон обледеніння ототожнюють з місцем розташування хмар [49, 102].

Однак і цей спосіб виявлення ЗНО має недолік, оскільки майже всі виявлені хмари за відомим способом можна вважати небезпечними, у той час як відомо, що обледеніння ПС відбувається тільки за наявності переохолоджених водяних крапель. Зазначений недолік призводить до невиправдано високого рівня хибних тривог при локалізації ЗНО, що знижує регулярність польотів і спричиняє погіршення економічних показників повітряного транспорту.

Метою цього розділу є підвищення достовірності виявлення ЗНО радіолокаційними засобами.

3.8. Логічні процедури виявлення зон небезпечного обледеніння

Розглянемо алгоритм визначення ЗНО повітряних суден, який вперше був запропонований Ф.Й. Яновським в заявці на отримання патенту СРСР №4898827/09 [49], на яку було отримано позитивне рішення. Пізніше автором цієї дисертаційної роботи були отримані два спільні патенти України на корисні моделі №100763 «Пристрій для визначення зон можливого обледеніння літаків и гелікоптерів» [10] і №98228 «Спосіб визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» [11].

Небезпечне можливе обледеніння ПС можна виявляти більш надійно через ускладнення описаного вище алгоритму, а саме: формуванням голчастої ДН антени замість віялової, випромінюванням імпульсів електромагнітних коливань і прийманням відбитих від гідрометеорологічних утворень сигналів у горизонтальній, вертикальній поляризаціях, а також використанням кросполяризаційної компоненти сигналів.

Алгоритм виявлення ЗНО працює таким чином (рис. 3.16):

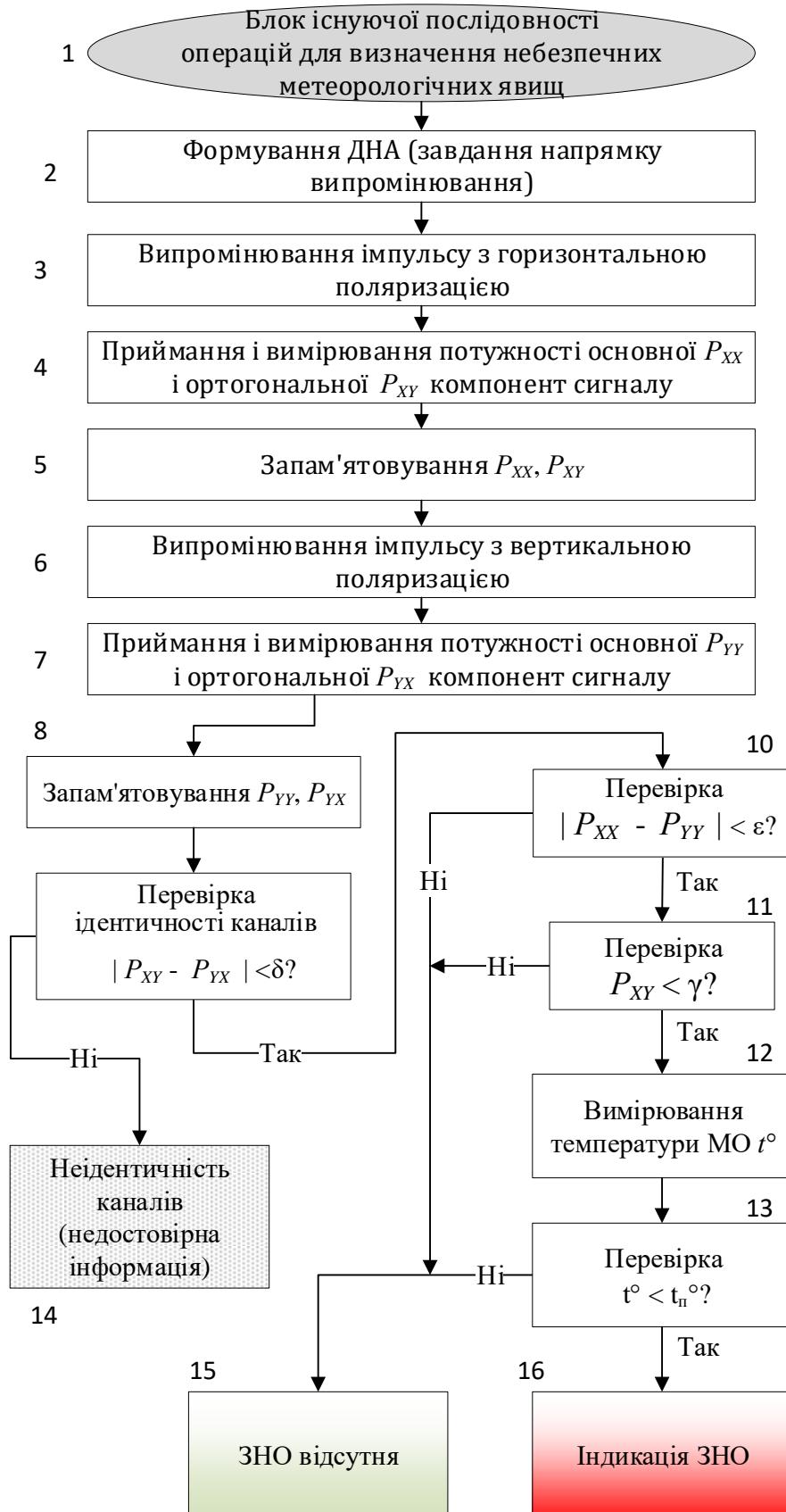


Рис. 3.16. Структурно-логічна схема послідовності операцій для визначення зон небезпечної обледеніння за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи [10, 11]

- 1) По черзі випромінюються горизонтально X поляризовані та вертикально Y поляризовані зондувальні імпульси, приймаються горизонтально X поляризована і вертикально Y поляризована компоненти відбитого сигналу по кожному випроміненому імпульсу, вимірюються потужності основних (P_{XX} і P_{YY}) і ортогональних (P_{XY} і P_{YX}) компонент відбитого сигналу, визначається температура гідрометеорологічного утворення, від якого відбиваються зондувальні імпульси.
- 2) Порівнюються між собою значення потужності основних компонент відбитого сигналу P_{XX} і P_{YY} , і за результатами цього порівняння, значенням ортогональних компонент P_{XY} і P_{YX} відбитого сигналу і відомим значенням температури приймається рішення про наявність чи відсутність ЗНО в обсязі простору, який задається напрямком випромінювання, часом запізнювання відбитих сигналів щодо випроменених імпульсів і тривалістю зондувальних імпульсів. Якщо температура менша або дорівнює температурі замерзання води і одночасно виконуються умови $P_{XX} = P_{YY}$ і $P_{XY} = P_{YX} = 0$, де P_{XX} – прийнята потужність горизонтально поляризованої компоненти відбитого сигналу при випромінюванні горизонтально поляризованого імпульсу, дБ; P_{YY} – прийнята потужність вертикально поляризованої компоненти відбитого сигналу при випромінюванні вертикально поляризованого імпульсу, дБ; P_{XY} – прийнята потужність вертикально поляризованої компоненти відбитого сигналу при випромінюванні горизонтально поляризованого імпульсу, дБ; P_{YX} – прийнята потужність горизонтально поляризованої компоненти при випромінюванні вертикально поляризованого імпульсу, дБ, то приймають рішення про наявність ЗНО, а в протилежному випадку – рішення про відсутність ЗНО.
- 3) Температуру гідрометеоутворення можна визначати вимірюванням температури повітря за бортом. У разі, коли зондувальні імпульси випромінюються похило, для отримання оцінки температури гідрометеоутворення вимірюється висота польоту ПС і результат вимірювання температури за бортом екстраполюється з урахуванням дальності до гідрометеоутворення відповідно до лінійної моделі зміни температури повітря залежно від висоти. Сутність запропонованого алгоритму пояснює рис. 3.16, на якому зображено схему, що ілюструє послідовність операцій одного з варіантів способу локалізації зон небезпеки обледеніння ПС.

Відповідно до запропонованого алгоритму, бортовий метеорологічний радіолокатор повинен формувати голкову ДН антени (блок 2), за допомогою якої забезпечується опромінення метеооб'єктів у заданому напрямку.

4) Далі випромінюються імпульс електромагнітних коливань (блок 3) заданої поляризації, наприклад, горизонтальної X. Тривалість імпульсу вибирається, виходячи з необхідної роздільної здатності за дальностю. Приймається відбитий від метеооб'єкта сигнал. Хоча відбиті сигнали також приймаються від усіх об'ємів простору, які мають відбивні властивості і перебувають у зоні огляду (за даним напрямком), з метою полегшення розуміння розглянемо сутність алгоритму на прикладі опромінення тільки одного об'єму відбиття, що не знижує загального розгляду [107, 108].

Поляризація прийнятого сигналу може відрізнятися від поляризації випроміненого сигналу, що зумовлено властивостями досліджуваного об'єкта (форми, орієнтації гідрометеорів та ін.). Тому прийнятий сигнал містить як основну, так і ортогональну компоненти. Прийнятий сигнал розщеплюється на дві ортогонально поляризовані складові (або може виконуватися двоканальне приймання). Оскільки розгляд розпочато з випромінювання горизонтально X поляризованого сигналу, то в результаті розщеплення отримаємо основну (в даному випадку горизонтально поляризовану X) і ортогональну (в даному випадку вертикально поляризовану Y) компоненти.

5) Далі вимірюється потужність кожної з двох отриманих ортогональних компонент відбитого сигналу P_{XX} і P_{XY} . Потім те ж саме повторюється за вертикальної поляризації зондувального імпульсу (блоки 4–8).

Необхідно відзначити, що порядок вимірювання величин P_{XX} , P_{XY} , P_{YX} , P_{YY} для сутності способу значення не має. Якщо вимірювання проводяться послідовно (тобто після розщеплення сигнал проходить через одноканальний приймач), то доцільно спочатку вимірювати основні компоненти, а потім ортогональні, наприклад, P_{XX} , P_{YY} , P_{YX} , P_{XY} і т. д. (доцільно P_{XX} і P_{YY} вимірювати поспіль, щоб параметри гідрометеорів практично не встигли змінитися). Якщо ж вимірювання проводяться паралельно (тобто після розщеплення кожна компонента сигналу надходить у свій канал), то

доцільно вимірювати паралельно обидві компоненти: P_{XX} , P_{XY} , потім P_{YY} , P_{YX} . Можливий також розподіл приймальних каналів, починаючи з антени.

Варто також зазначити, що основна корисна інформація міститься не в абсолютних значеннях сигналів, а в значеннях різниці між ними. Тому метрологічні проблеми тут не виникають, необхідно лише забезпечити нормальні вимоги до стабільності характеристик апаратури. Процес вимірювання може бути зведений до запам'ятовування значення амплітуди сигналу на виході приймача, яка монотонно пов'язана з потужністю вхідного сигналу радіолокатора.

6) Далі визначається модуль різниці $|P_{XY} - P_{YX}|$ і порівнюється із граничним значенням δ (блок 9). Сенс цієї процедури полягає в тому, щоб проконтрлювати ідентичність каналів вимірювання основної та ортогональної складових. Відповідно до теорії значення P_{XY} і P_{YX} повинні бути рівні між собою. Тому, якщо $|P_{XY} - P_{YX}| \geq \delta$, то це свідчить про недостатню ідентичність каналів вимірювання. У цьому випадку різниця значень P_{XX} і P_{YY} також може бути зумовлена особливостями апаратури, а не метеооб'єкта і, отже, достовірність локалізації ЗНО буде нижчою від необхідної (блок 14).

Якщо виконано умову $|P_{XY} - P_{YX}| < \delta$, то визначається модуль різниці основних компонент сигналу $|P_{XX} - P_{YY}|$ і порівнюється з порогом ε (блок 10). Сенс цієї операції полягає в тому, що для сферичних частинок, якими в першому наближенні є краплі води, значення P_{XX} і P_{YY} мають бути приблизно однаковими. Для несферичних частинок, якими є крижані кристали, значення P_{XX} і P_{YY} повинні відрізнятися тим більше, чим сильніше виражена несферичність частинок. Тому в разі $|P_{XX} - P_{YY}| \geq \varepsilon$ приймається рішення про відсутність ЗНО, оскільки об'єкт складається із крижаних кристалів (точніше він **не** складається з водяних крапель). У разі коли $|P_{XX} - P_{YY}| < \varepsilon$ можна зробити висновок, що об'єкт складається із сферичних крапель води або кристали хаотично (довільно) орієнтовані у просторі, наприклад, через турбулентне перемішування.

7) Наступна операція (блок 11) – перевірка $P_{XX} < \gamma$, яка дозволяє вилучити припущення про хаотичну орієнтацію кристалів. Річ у тім, що наявність

несиметричних (несферичних) частинок, навіть хаотично орієнтованих, означає наявність ортогональної поляризаційної складової у відбитому сигналі, тобто $P_{XY} \neq 0$, і також $P_{YX} \neq 0$, що підтверджується розрахунками в розділі 2. І навпаки, наближеність до нуля значень P_{XY} і P_{YX} свідчить про те, що ортогональної складової немає, отже, досліджуваний об'єкт складається не з кристалів, а із сферичних частинок, тобто водяних крапель. Оскільки приблизну рівність $P_{XY} \approx P_{YX}$ було встановлено раніше (блок 9), то досить перевірити на поріг γ одне (будь-яке) зі значень P_{XY} або P_{YX} .

8) У такому випадку обледеніння можливе, якщо краплі є переохолодженими. Чи краплі є переохолодженими, визначають за допомогою операцій 12 і 13. Якщо температура об'єкта t^o виявляється нижчою за встановлений пороговий рівень t_n , то приймається рішення, що об'єкт (об'єм хмари, що досліджується) являє собою небезпеку для ПС як ЗНО. В інших випадках ($P_{XX} \neq P_{YY}$ або $P_{XY} \approx P_{YX} \neq 0$ або $t^o \geq t_n$) приймається рішення про відсутність ЗНО (блок 15).

3.9. Вимоги до порогових рівнів основних параметрів [70]

Розглянемо вимоги до порогових рівнів δ , ε , γ і t_n . Величина порогового рівня δ визначає ступінь максимально допустимої неідентичності каналів вимірювання вертикальної і горизонтальної складових сигналу. Тому значення δ має бути близьким до нуля в ідеальній системі, точніше в ідеальній системі потрібно було б перевіряти $P_{XY} - P_{YX} = 0$ замість $|P_{XY} - P_{YX}| < \delta$. Реально логічно було б вимагати, щоб δ було принаймні не більшим за ε :

$$\delta \leq \varepsilon. \quad (3.1)$$

Якщо встановити δ дуже малим, то це може привести до непрацездатності способу, оскільки через інструментальні похибки і різні випадкові або детерміновані дестабілізуючи фактори і перешкоди умова $|P_{XY} - P_{YX}| < \delta$ може не виконуватися, і станеться зациклення операцій способу по зв'язку «Ні» між блоками 11 і 9.

Таким чином, вважаючи умову (3.1) такою, що визначає верхню межу порога δ , вимоги до δ , записуються у вигляді

$$3\sigma \leq \delta \leq \varepsilon, \quad (3.2)$$

де σ – середньоквадратичне значення потужності власних шумів на виході приймального каналу.

Величина порогового рівня ε визначається з таких міркувань. Оскільки теоретично в разі строго сферичних відбивачів виконується рівність $P_{XX} = P_{YY}$, то чим менша величина ε , тим менші відхилення від симетричності частинок будуть помічені. Зрозуміло, що зі збільшенням ε буде знижуватися ймовірність хибної тривоги, але також буде знижуватися і ймовірність правильного виявлення. Необхідно також мати на увазі, що реальні краплі також можуть бути не цілком симетричними. Як випливає з експериментальних даних та розрахунків, виконаних у розділі 2, відхилення значень диференціальної відбиваності P_{XX} / P_{YY} від одиниці на 0,25 дБ вже є інформативними. Можна також врахувати, що краплі внаслідок падіння дещо сплющені, тобто $P_{XX} > P_{YY}$, і трохи збільшити значення порога ε .

Таким чином, орієнтовні вимоги до порога ε можуть бути записані у вигляді

$$3\sigma \leq \delta \leq \varepsilon_{\max}, \quad (3.3)$$

де ε_{\max} – максимальне значення порога, яке орієнтовно дорівнює 1 дБ (за потужністю).

Вимоги до порогового рівня γ визначаються з таких міркувань. Чим більше значення γ , тим вища ймовірність виявлення ЗНО, але тим вища і ймовірність хибної тривоги. З огляду на наведені вище міркування, можна записати наступну систему нерівностей, яка орієнтовно визначає вимоги до значень γ :

$$\delta \leq \gamma \leq k\delta, \quad (3.4)$$

де k – певний коефіцієнт ($k > 1$), наприклад, $k = 3$.

Граничний рівень температури t_n вибирається з умови:

$$t_n = 0 + \Delta t, \quad (3.5)$$

де 0°C – температура замерзання води; Δt – додаток, який враховує похибки визначення температури. Якщо поставити умову незниження ймовірності правильного виявлення ЗНО (або незбільшення ймовірності пропуску ЗНО), то очевидно, що величина Δt повинна додаватися зі знаком плюс, тобто:

$$t_n > 0. \quad (3.6)$$

Значення Δt визначається сумарною некомпенсованою похибкою оцінки температури метеорологічного об'єкта, і може також включати певний «запас міцності». З урахуванням викладеного, значення t_n має орієнтовно лежати в межах

$$0 < t_n < 10^{\circ}\text{C}. \quad (3.7)$$

Конкретні значення порогових рівнів у δ , ε , γ і t_n формулах (3.1–3.7) повинні бути уточнені експериментально.

Висновки до третього розділу

1. Удосконалено метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи шляхом додавання послідовності операцій для виявлення нового класу об'єктів – зон небезпечного обледеніння, що дозволяє розширити перелік небезпечних метеорологічних явищ, інформацію про існування та розвиток яких можна отримати за допомогою бортової інформаційної метеорологічної системи в оперативному режимі.

2. Показано, що результати експериментальних вимірювань добре узгоджуються з результатами моделювання відбиття сканувального променя інформаційної метеорологічної системи від метеорологічних утворень, які наведено у розділі 2 цієї роботи. Отримані результати третього розділу підтвердили можливість розроблення алгоритму, який повинен попереджати пілота про небезпеку обледеніння на підставі даних дистанційного зондування метеорологічних об'єктів радіолокаційним способом

3. Безпосередній внесок автора полягає в аналізі й зіставлені практичних даних, отриманих з різних експериментальних джерел, що дозволяє стверджувати про коректні результати теоретичних розрахунків поляризаційних параметрів радіолокаційного сигналу, відбитого від різних типів гідрометеорів; було розроблено новий спосіб виявлення ЗНО.

Матеріали цього розділу відображені в таких публікаціях автора: [14, 29, 31, 33] і деяких інших роботах.

Список використаних джерел у третьому розділі

94. Коростелев В. С. Экспериментальные исследования спектров когерентных сигналов, отраженных от снегопада в диапазоне 140 ГГц / В. С. Коростелев, Г. И. Хлопов, В. П. Шестопалов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1991. – 34, № 3. – С. 227–233.

95. Khlopov G. I. Spectra of the Coherent Millimeter Wave Signals, reflected from Hydrometeors / G. I. Khlopov // Tele- communications and Radio Engineering. – 1997. – 51, N 1. – P. 17–24.

96. Ohtake T. Radar reflectivity of aggregated snowflakes / T. Ohtake, T. Henmi // 14th Conf. Radar Meteor. – Boston: American Meteorological Society, 1970. – PP. 209–210.

97. Heijnen S.H. TARA: Development of a new Transportable Atmospheric Radar. / Heijnen S.H., Ligthart L.P. // Proc. 5th International Conf. Radar Systems, session Radar Systems 1, Brest, France, 1999.

98. The PARSAK – New Full Polarimetric FMCW Radar with Dual-Orthogonal Signals, Oleg A. Krasnov, Leo P. Lighthart, Galina P. Babur, Fred van der Zwan. Proc. of the 8th International Symposium on Tropospheric Profiling, (PP. S06 - P08 – 1-4).
99. Babur G. Processing Of Dual-Orthogonal CW Polarimetric Radar Signals. – The thesis of master degree. – TU Delft, 2009. – 158 P.
100. Holt A. R. Electromagnetic wave scattering by spheroids: A comparison of experimental and theoretical results / A. R. Holt // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1982. – AP-30. – PP. 758-760.
101. Barber P. Scattering of electromagnetic waves by arbitrarily shaped dielectric bodies / P. Barber, C. Yeh // Appl. Opt. – 1975. – 14, Iss. 12. – PP. 2864–2872.
102. C. Leifeld, Diagnosing And Forecasting Inflight Icing Environments Using ADWICE, [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://ams.confex.com/ams/pdffiles/81709.pdf>.
103. Кулемин Г. П. Обратное рассеяние радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов осадками и другими атмосферными образованиями / Г. П. Кулемин. – Х.: ИРЭ НАН Украины, – (Препр. / АН Украины, Ин-т радиофизики и электрон., № 287). 1985. – 34 С.
104. Хлопов Г. И. Когерентная радиолокация в миллиметровом диапазоне / Г. И. Хлопов // Зарубежная радиоэлектрон. Успехи современной радиоэлектрон. – 1999. – № 9. – С. 3–27.
105. Сухаревский О. И. Расчет характеристик радиолокационного рассеяния гидрометеоров методом интегральных уравнений / О. И. Сухаревский, Г. С. Залевский, А. Б. Веселовская // Прикладная радиоэлектрон. – 2015. – 14, № 1. – С. 111–118.
106. Шупляцкий А. Б. Радиолокационное измерение интенсивности и некоторых других характеристик осадков / А. Б. Шупляцкий. – М.: Гидрометеоиздат, 1960. – 119 С.
107. Радиолокационные измерения осадков / А. М. Боровиков, В. В. Костарев, И. П. Мазин, А. А. Черников. – М: Гидро- метеоиздат, 1967. – 140 С.

Список публікацій здобувача за матеріалами третього розділу

108. Pitertsev A.A. Advanced Algorithm for Radar Detection of Icing. Calculation of Polarimetric Observables / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // “Telecommunications and Radio Engineering”. – Volume 66, 2007, Issue 12. – 2007. – С. 1465-1471 (журнал США, Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено опис алгоритму визначення ЗНО та розрахунки параметрів відбитого від гідрометеорів сигналу.

109. Pitertsev A.A. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // Proceedings of the 37th European Microwave Conference, 978-2-87487-001-9. – EuMA, Мюнхен, Німеччина: 2007. – С. 1550-1553 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено опис поляриметричного підходу до визначення ЗНО взагалі та конкретний алгоритм для його реалізації.

110. Обнаружение зон потенциального обледенения самолетов при радиолокационном зондировании метеорологических объектов / Питерцев А.А. // X.: ИПЕ НАН журнал «Радиофизика и электроника». – 2006. – Том 11, № 1. – С. 74-77.

Особистий внесок здобувача: наведено основні принципи використання бортового поляриметричного радіолокатора для визначення ЗНО.

111. Пітерцев О.А., Яновський Ф.Й. Патент України на корисну модель № 98228 «Спосіб визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» від 27.04.2015.

Особистий внесок здобувача: наведено опис способу визначення ЗНО.

112. Пітерцев О.А., Яновський Ф. Й. Патент України на корисну модель № 100763 «Пристрій для визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» від 10.08.2015.

Особистий внесок здобувача: наведено опис пристрою для визначення ЗНО.

РОЗДІЛ 4

МЕТОД БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ СТУПЕНЯ ЗАГРОЗИ ОБЛЕДЕНИННЯ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

4.1. Оцінювання достовірності виявлення зон небезпечного обледеніння

Розрахуємо конкретні значення порогових рівнів інформативних поляриметричних параметрів процедури визначення зон потенційного небезпечного обледеніння ПС з урахуванням різних вимог до достовірності визначення цілі. Визначимо передусім оптимальні значення цих параметрів за допомогою критерію Неймана-Пірсона [109]. Позначимо простір рішень, у якому існують два стани:

- 1) є небезпека обледеніння ПС, що має на увазі наявність в досліджуваному обсязі метеорологічного об'єкта (хмари) переохолоджених крижаних крапель;
- 2) немає небезпеки обледеніння ПС, коли досліджуваний метеорологічний об'єкт містить, наприклад, крижані кристали.

Припустімо, що щільність імовірності обох подій описується нормальним (гаусовим) законом розподілу ймовірностей. Тоді позначимо ймовірність правильного виявлення як D , а ймовірність хибної тривоги як F . Тоді ймовірність правильного виявлення зони ймовірного обледеніння за одним параметром Z_{DR} можна записати як

$$D_{Z_{DR}} = \int_{F_0}^{\infty} p_{\text{drops}}(Z_{DR_{\text{drops}}}) dZ_{DR}, \quad (4.1)$$

де $Z_{DR_{\text{drops}}}$ – значення диференціальної відбиваності для випадку наявності зони ймовірного обледеніння (тобто наявності переохолоджених крапель води), починаючи з порога прийняття рішення F_0 ; p_{drops} – функція, що описує ймовірність обледеніння за заданих значень диференціальної відбиваності. А ймовірність хибної тривоги за одним параметром Z_{DR} становить

$$F_{Z_{DR}} = \int_{F_0}^{\infty} p_{crystals}(Z_{DR_{crystals}}) dZ_{DR}, \quad (4.2)$$

де $Z_{DR_{crystals}}$ – значення диференціальної відбиваності, для випадку відсутності зони ймовірного обледеніння ПС, тобто коли досліджуваний об'єм містить кристали льоду. Функція $p_{crystals}$ – імовірність відсутності обледеніння яка також описується гаусовим (нормальним) законом розподілу.

Аналогічно для лінійного деполяризаційного відношення ймовірність правильного виявлення:

$$D_{LDR} = \int_{-\infty}^{F_0} p_{drops}(LDR_{drops}) dLDR, \quad (4.3)$$

а ймовірність хибної тривоги, відповідно:

$$F_{LDR} = \int_{-\infty}^{F_0} p_{crystals}(LDR_{crystals}) dLDR. \quad (4.4)$$

Спираючись на результати математичного моделювання, наведені в розділі 2, позначимо область значень $Z_{DR_{drops}}$ у діапазоні (0...0.2), область значень $Z_{DR_{crystals}}$ у діапазоні (-1...0), область значень LDR_{drops} у діапазоні (-30...-50), область значень $LDR_{crystals}$ у діапазоні (-15...-25).

Графічно значення D і F представлені на рис. 4.1, 4.2.

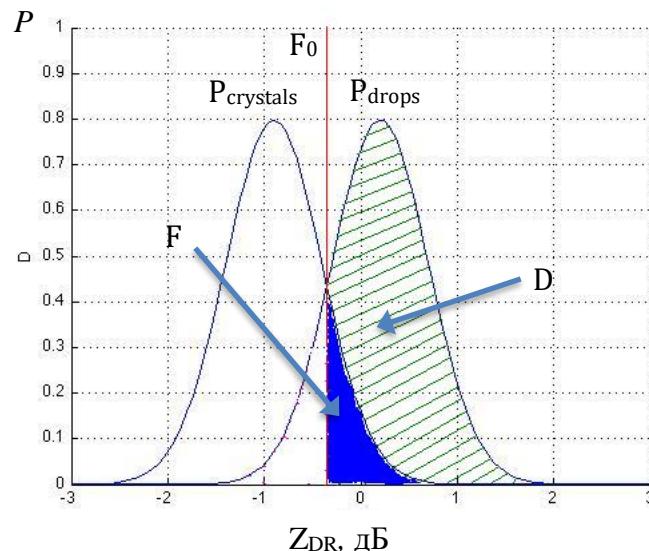


Рис. 4.1. Одновимірні щільності розподілу ймовірностей виявлення кристалів льоду і крапель води по параметру Z_{DR}

Згідно з критерієм Неймана–Пірсона, за умови, що одновимірні щільності розподілу ймовірностей виявлення крижаних кристалів і переохолоджених крапель води описуються нормальним законом розподілу, оптимальними значеннями порога прийняття рішення F_0 можуть бути значення $F_0 = -0.4$ дБ для параметра Z_{DR} , і $F_0 = -27$ дБ для параметра LDR, як зображене на рис. 4.1, 4.2.

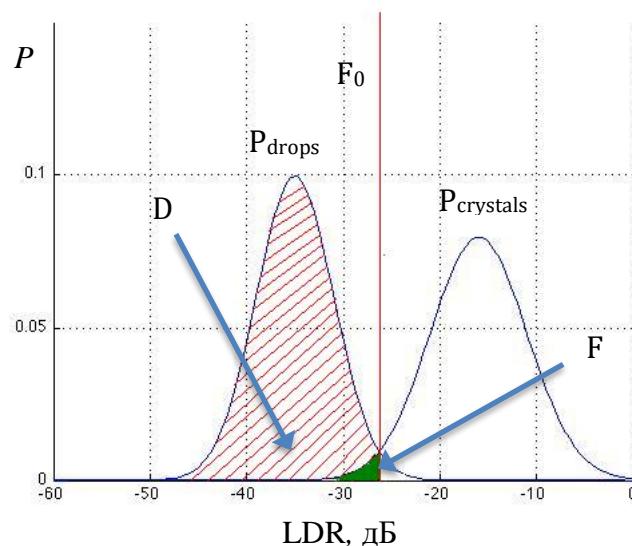


Рис. 4.2. Одновимірні щільності розподілу ймовірностей виявлення кристалів льоду і крапель води по параметру LDR

За обраних значень порогового рівня ймовірність правильного рішення D і ймовірність хибної тривоги F , що визначаються відповідно до формул (4.3, 4.4) як площа під графіками на рис. 4.1 для параметра Z_{DR} і на рис. 4.2 для параметра LDR , набувають значення:

$$D_{Z_{DR}} = 0.885, F_{Z_{DR}} = 0.159, \quad (4.5)$$

а для параметра LDR приймають значення

$$D_{LDR} = 0.977, F_{LDR} = 0.014. \quad (4.6)$$

З отриманих розрахункових значень D і F видно, що визначення зони ймовірного зледеніння ПС тільки за одним параметром не є дуже надійним.

Розрахуємо ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги, використовуючи двопараметричний підхід. Графік двовимірної щільності ймовірності з припущення все того ж нормального розподілу ймовірностей зображенено на рис. 4.3. Тоді ймовірність правильного виявлення D буде дорівнювати числовому значенню подвійного інтеграла:

$$D = \int_{F_{Z_{DR}}}^{\infty} \int_{-\infty}^{F_{LDR}} p_{\text{drops}}(LDR_{\text{drops}}, Z_{DR_{\text{drops}}}) dLDR dZ_{DR}, \quad (4.7)$$

а ймовірність хибної тривоги

$$F = \int_{F_{Z_{DR}}}^{\infty} \int_{-\infty}^{F_{LDR}} p_{\text{crystals}}(LDR_{\text{crystals}}, Z_{DR_{\text{crystals}}}) dLDR dZ_{DR}. \quad (4.8)$$

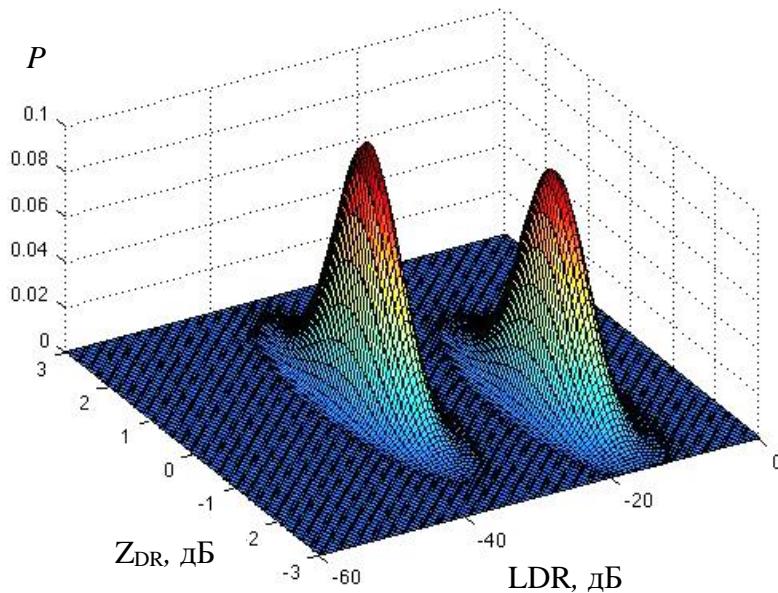


Рис. 4.3. Двовимірні щільності розподілу ймовірностей виявлення кристалів льоду і крапель води за параметрами LDR і Z_{DR}

Розрахуємо числові значення D і F з використанням тих же порогових рівнів F_0 , що й обрані в разі одновимірних щільностей ймовірності. А саме: якщо $F_{Z_{DR}} = -0,4$, а $F_{LDR} = -27$ дБ. У цьому випадку ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги можуть відповідно становити: $D = 0,802$, $F = 1,6 \cdot 10^{-7}$.

4.2. Оцінювання температури досліджуваного метеорологічного об'єкта

Розглянемо тепер дії, за допомогою яких можна реалізувати операцію вимірювання температури метеорологічного об'єкта в одному з варіантів реалізації запропонованого способу. За основу алгоритму вимірювання температури може бути обраний спосіб, описаний у праці [70].

Так, температуру зовнішнього повітря можна виміряти за допомогою штатного термометра зовнішнього повітря, наявного на борту ПС. У разі горизонтального зондування (паралельно поверхні землі) значення вимірюної температури приймається за оцінку температури досліджуваного метеорологічного об'єкта.

У разі похилого зондування оцінюється різниця висот Δh між ПС і досліджуваним об'єктом:

$$\Delta P = R \sin(\eta), \quad (4.9)$$

де R – дальність до досліджуваного об'єкта; η – кут нахилу променю антени у вертикальній площині. Тоді температура може бути визначена як

$$t = T + \gamma \cdot R \cdot \sin(\eta), \quad (4.10)$$

де T – температура за бортом; γ – градієнт температури [19].

Більш детальні дані про висотний градієнт температур в атмосфері наводяться у дод. 3 цієї роботи.

Визначення температури метеорологічного об'єкта, придатного за поляриметричними ознаками під ЗНО ПС, є важливим кроком в роботі алгоритму виявлення ЗНО. Утім способу визначення температури метеорологічного утворення, який базується на температурному градієнти висот [70], притаманні певні недоліки. Так, для обчислення показника температури на висоті, що цікавить за допомогою методу висотного градієнта температур, необхідно врахувати багато факторів. Причому значення деяких з них схильні до сезонних і добових коливань. Ці значення не можна визначити з точністю, достатньою для практичного застосування даного алгоритму виявлення ЗНО. Тому альтернативою запропонованому в праці [70] методу, є визначення температури за допомогою пасивних радіометричних вимірювань. Детальний розгляд пасивних радіометричних систем виходить за межі дисертаційної роботи. Як приклад дистанційного вимірювача температури, що діє за принципом пасивного радіометра, можна навести прилад МТР-5 (рис. 4.4), який було продемонстровано автором на конференції RMSW-2012 в Києві [110].



Рис. 4.4. Прилад для дистанційного вимірювання температурного профіля атмосфери [110]

Запропонований спосіб локалізації ЗНО відрізняється високою оперативністю і не потребує значних додаткових апаратних витрат за винятком антени з керованою поляризацією.

4.3. Алгоритм виявлення зон небезпечного обледеніння та класифікатор рівня загрози з використанням математичного апарату нечіткої логіки [57, 118, 119, 120]

Для підвищення точності локалізації небезпечних для ПС зон доцільно використовувати якомога більше інформативних параметрів, що стосуються до об'єкта дослідження та доступні для вимірювання.

Емпіричні зв'язки між величинами поляриметричних параметрів відбитого сигналу і типом гідрометеорів у хмарах показано на рис. 4.5–4.8 [57].

Окрім наведених у *підрозділі 4.1* величин P_{XX} , P_{XY} , P_{YX} , P_{YY} та температури повітря для створення надійного алгоритму виявлення ЗНО можна використовувати значення радіолокаційної відбиваності, диференційної відбиваності, лінійного деполяризаційного відношення, коефіцієнта кореляції з нульовим зсувом (формули (2.18) – (2.23)), диференціальну фазу та інші характеристики відбитого сигналу, наприклад ті, що пов'язані з ефектом Доплера [8, 51, 57, 59].

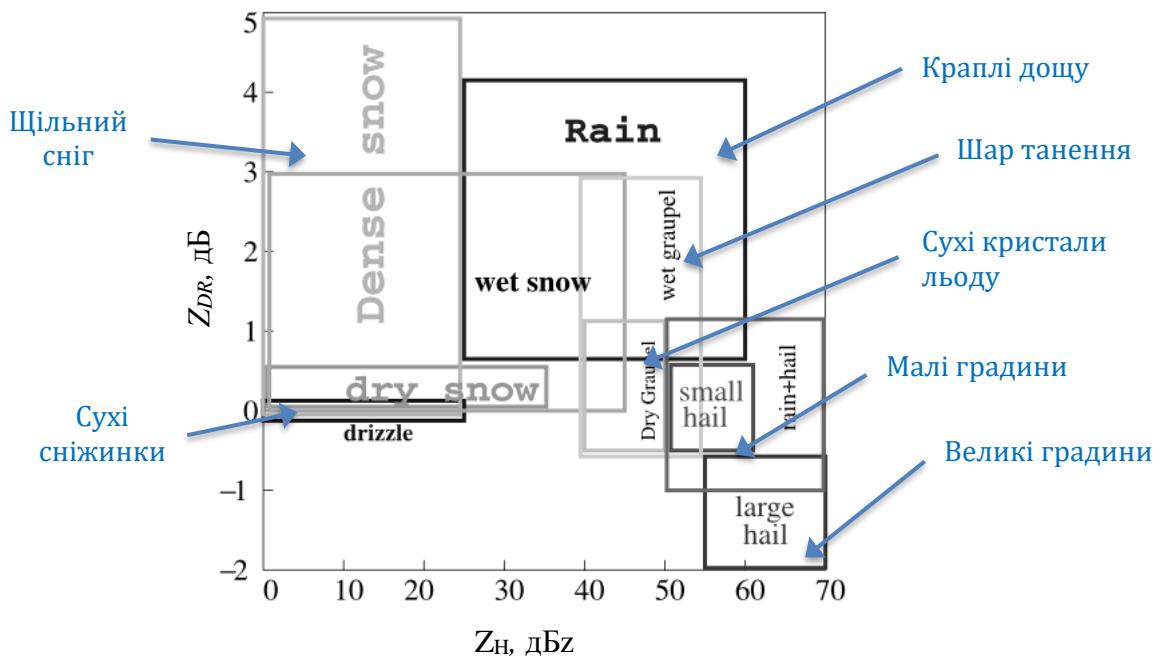


Рис. 4.5. Емпіричний зв'язок між РВ на горизонтальній поляризації відбитого сигналу та ДВ для різних типів гідрометеорів у складі хмари [57]

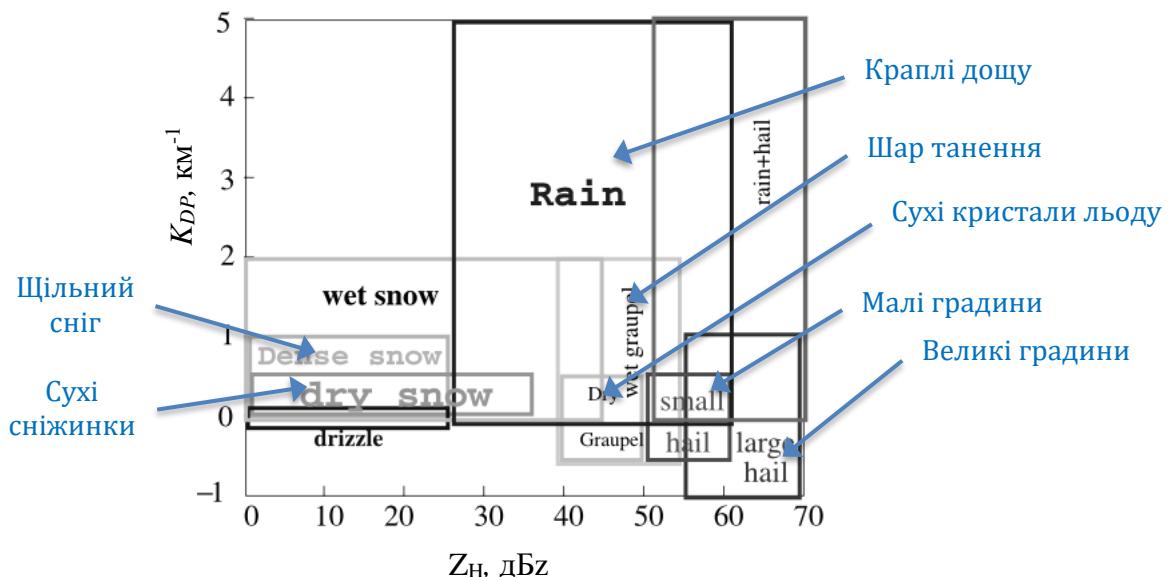


Рис. 4.6. Емпіричний зв'язок між РВ на горизонтальній поляризації відбитого сигналу та диференціальною фазою для різних типів гідрометеорів у складі хмари [57]

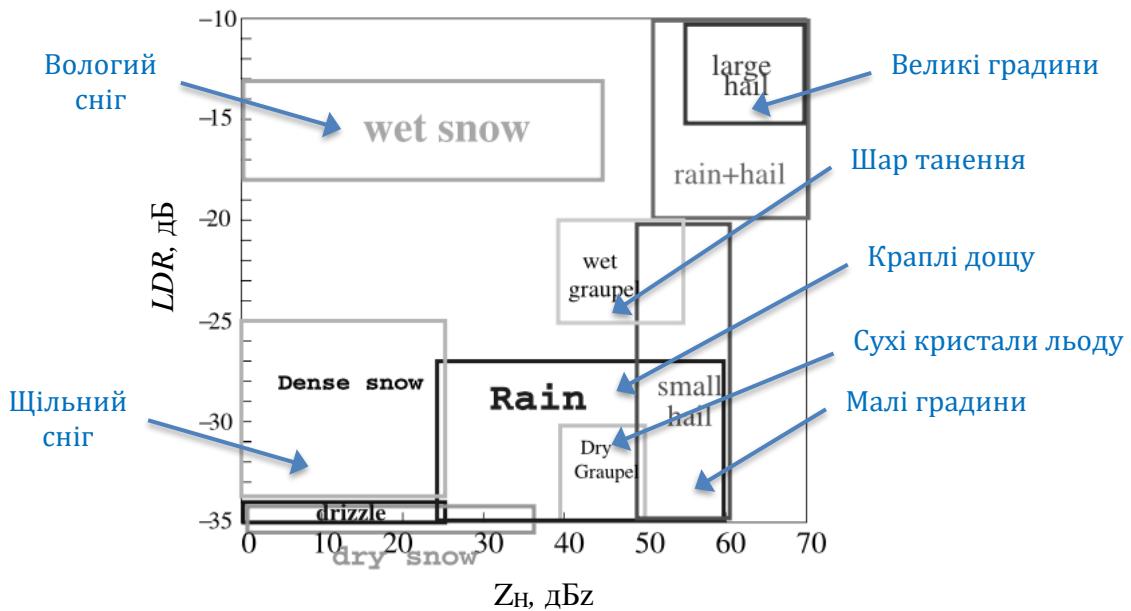


Рис. 4.7. Емпіричний зв’язок між РВ на горизонтальній поляризації відбитого сигналу та ЛДВ для різних типів гідрометеорів у складі хмари [57]

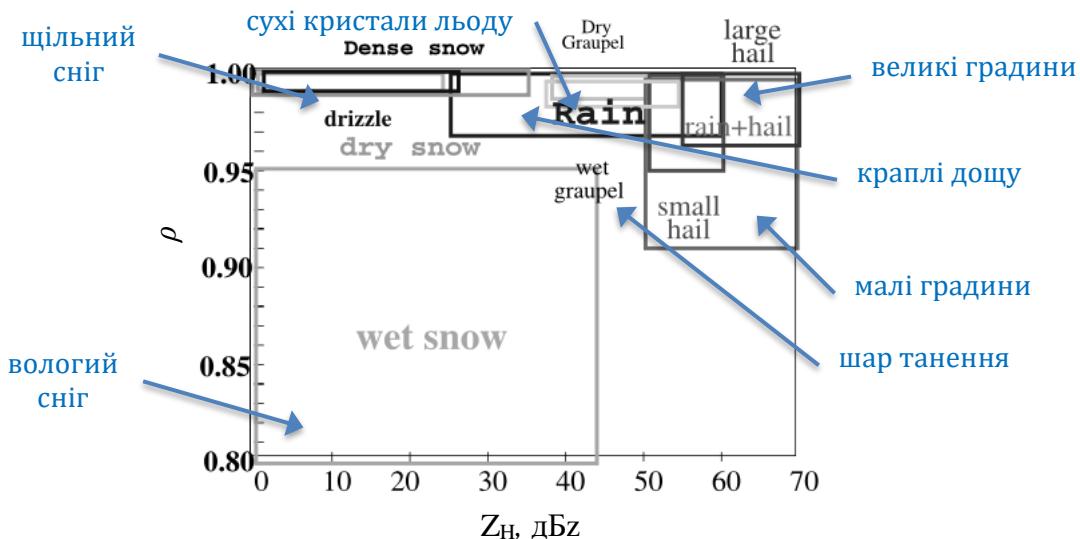


Рис. 4.8. Емпіричний зв’язок між РВ на горизонтальній поляризації відбитого сигналу та КК для різних типів гідрометеорів у складі хмари [57]

Можна використовувати також параметри, які не належать безпосередньо до метеорологічного радіолокатора, але пов’язані з імовірністю виникнення ЗНО: температуру повітря, висоту та швидкість польоту ПС, деякі конструктивні характеристики ПС, наприклад, товщину профілю крила та ін. [41, 42]. Вплив

параметрів ПС та навколошнього середовища детально розглянуто у *підрозділі 1.3 дод. 1.*

Зони небезпечного обледеніння можуть формуватися через декілька природних механізмів або сценаріїв [2, 102]. Тому додатковими факторами, що мають вплив на імовірність формування можуть бути географічні координати ПС (наявність великих мас води поряд може істотно підвищити можливість виникнення ЗНО), пора року, наявність висхідних потоків повітря тощо [102]. Детальніше механізми формування ЗНО та вплив деяких з наведених вище факторів розглянуто у *дод. 2* цієї роботи.

Ураховувати таку велику кількість факторів, спираючись на класичний підхід з використанням щільноті розподілення імовірностей, досить складно, тому в цій роботі запропоновано альтернативний підхід до питання прийняття рішень щодо наявності або відсутності ЗНО, що базується на використанні математичного апарату нечіткої логіки [57, 118, 119]. Оскільки значення поляриметричних вимірювань параметрів для різних типів гідрометеорів не є взаємовиключними, використання нечіткої логічної системи має багато суттєвих переваг, оскільки система нечіткої логіки насамперед розроблена для досягнення чіткого рішення на основі даних, що мають не чітко встановлені межі у діапазоні значень [120]. Іншою великою перевагою нечіткої логічної системи є те, що її параметри можна регулювати за допомогою використання вимірювань та попередніх даних.

Математичний апарат нечіткої логіки вперше запропонував у середині 1960-х років професор Лотфі А. Заде з Каліфорнійського університету в Берклі. Натепер вона широко прийнята і застосовується в науковій спільноті. Л. Заде розширив класичне поняття множини [122], припустивши, що характеристична функція (функція належності елемента множини) може набувати будь-які значення в інтервалі $[0; 1]$, а не тільки значення 0 або 1. Такі множини були названі ним нечіткими (*fuzzy*). Він визначив також ряд операцій над нечіткими множинами і запропонував узагальнення відомих методів логічного виводу. Увівши потім поняття лінгвістичної змінної [123] і допустив, що її значення (термів) є нечіткі множини, Л. Заде створив апарат для опису процесів інтелектуальної діяльності, включаючи нечіткість і невизначеність виразів [120].

Основна ідея нечіткої логіки полягає в тому, що нечіткий набір дозволяє елементам належати до нього зі ступенем від 0 до 1 і описується функцією належності, яка отримує значення в інтервалі [0; 1].

Для створення моделі прийняття рішень щодо існування та ступеня загрози ЗНО використано такі параметри (формули (2.18) – (2.25)):

- радіолокаційну відбиваність при горизонтальній поляризації Z_H ;
- диференціальну відбиваність Z_{DR} ;
- лінійне деполяризаційне відношення LDR_{hv} ;
- кореляційний коефіцієнт при нульовому зсуві $\rho_{hv}(0)$;
- питому диференційну фазу K_{DP} ;
- висоту об'єму спостереження h ;
- швидкість польоту V ;
- температура повітря t^0 ;
- час перебування у зоні небезпеки T .

Численні теоретичні та експериментальні дані, що були наведені у попередніх розділах цієї роботи, дозволяють зробити такі спрощені висновки. Радіолокаційна відбиваність Z_H чутлива до розміру гідрометеора, тоді як диференціальна відбиваність Z_{DR} пов'язана з його середньою формою. Лінійне деполяризаційне відношення LDR_{hv} є показником середнього кута орієнтації гідрометеора: чим нижче значення LDR_{hv} , тим менший середній кут нахилу, а найнижчі значення LDR_{hv} указують на сферичні розсіювачі або їх симетрію відносно площин поляризації сканувального променя локатора. Питома диференційна фаза K_{DP} показує переважний напрямок орієнтації основної півосі гідрометеорів: додатні значення K_{DP} указують на вирівнювання вздовж горизонту основної півосі і навпаки. Кореляційний коефіцієнт при нульовому зсуві $\rho_{hv}(0)$ чутливий до розподілу форми та орієнтації гідрометеорів. У багатьох випадках він містить аналогічну інформацію, що і LDR_{hv} , проте його можна простіше виміряти ніж дуже малі значення LDR_{hv} у більшості випадків.

Функції належності вхідних даних побудовані на основі результатів математичного моделювання *розділу 2* цієї роботи, поляриметричних характеристик гідрометеорів [121], наведених на рис. 4.6–4.9, аналізу впливу швидкості, висоти, температури та часу польоту ПС, що наведені у *підрозділі 1.3 дод. 2* цієї роботи.

Існують численні форми функцій, які зазвичай використовуються як функції належності, такі як трикутні, трапецієподібні, гаусівські форми, бета-функції, сигмоїдні функції. У цьому розділі використано гаусівські, а також сигмоїдні функції та різницю сигмоїдних функцій, оскільки сигмоїдні функції мають широку плоску область, у якій максимальне значення дорівнює 1, що може містити переважну область значень для деяких вхідних параметрів. Сигмоїдна функція визначається як

$$f(x, a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}, \quad (4.11)$$

а різниця сигмоїдних функцій так:

$$f(x, a, c_1, c_2) = f(x, a, c_1) - f(x, a, c_2). \quad (4.12)$$

Одну з можливих реалізацій нечіткого детектора та класифікатора ступеня загрози ЗНО показано на рис. 4.9.

Алгоритм навчання нечіткої системи виглядає таким чином:

- 1) на входи класифікатора подаються вимірюнні значення поляриметричних параметрів, висоти, швидкості ПС та температури повітря;
- 2) визначається похибка між відгуком системи у (ступенем загрози ЗНО) та відомим ступенем загрози y_t (що може бути визначений для конкретного типу ПС методом експертних оцінок): $\varepsilon = y - y_t$;
- 3) якщо помилка $\varepsilon = 0$, переходимо до наступних вимірювань, в іншому випадку налаштовуємо функції належності методом градієнта, описаним у наступному кроці;

- 4) налаштування функції належності виконуються лише на нечіткі множини, що відповідають класам U та U_t за винятком нульового класу (немає небезпеки обледеніння). Відповідні правила налаштовують ступені відкликув R_U та R_{U_t} для класів U та U_t .
- 5) повертаємося до кроку 1).

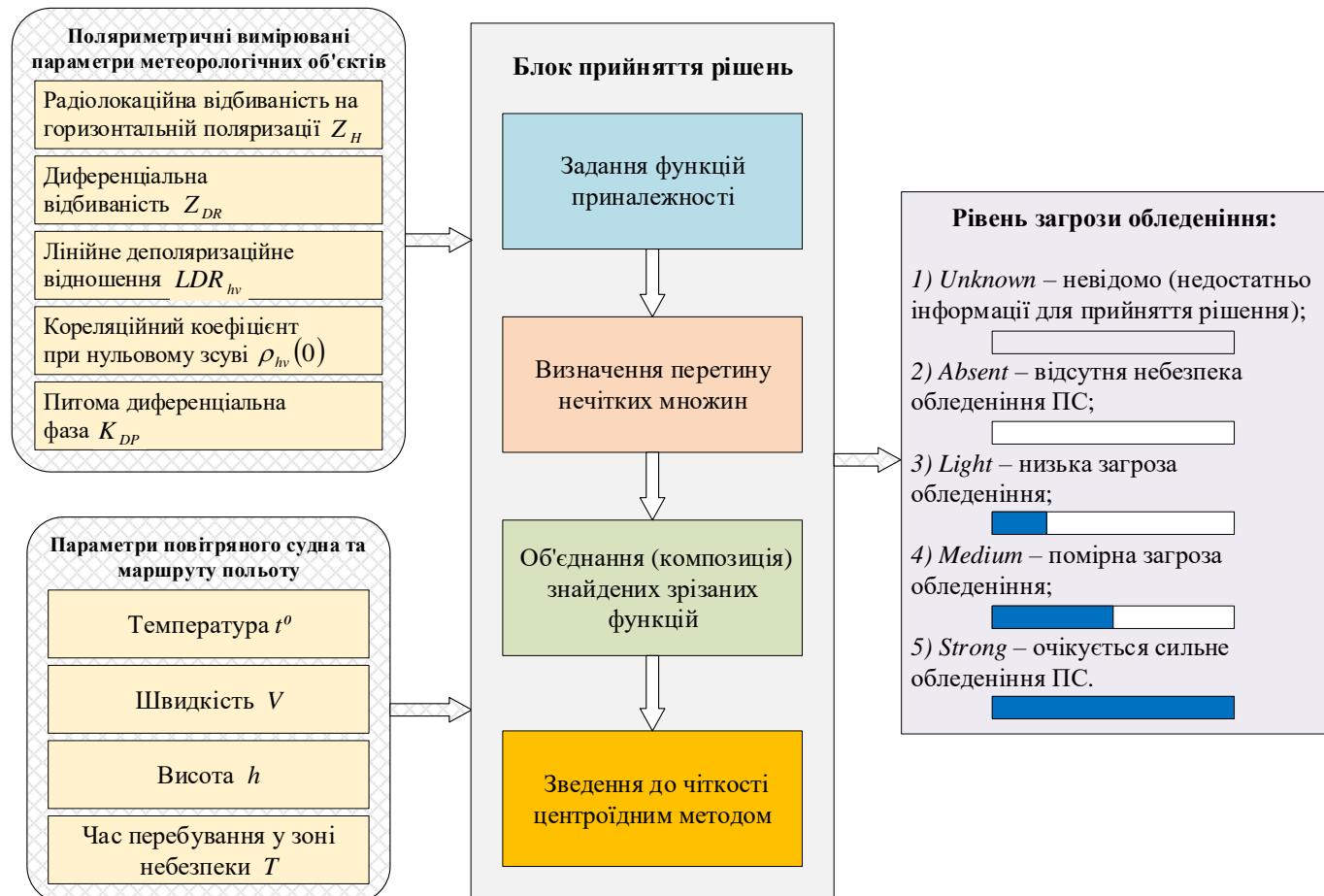


Рис. 4.9. Структурно-логічна схема методу багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння

Приклади функцій належності для таких вхідних змінних як РВ на горизонтальній поляризації та висота польоту показано на рис. 4.10, 4.11. Як можна бачити з рис. 4.10, 4.11, в області значень обох параметрів створено лінгвістичні змінні [123], *Medium* і *High* для РВ та *about-3-6-km* і *Very-high* для висоти польоту відповідно. Значення лінгвістичних змінних обрано в таких діапазонах, які відповідають існуванню ЗНО та її відсутності.

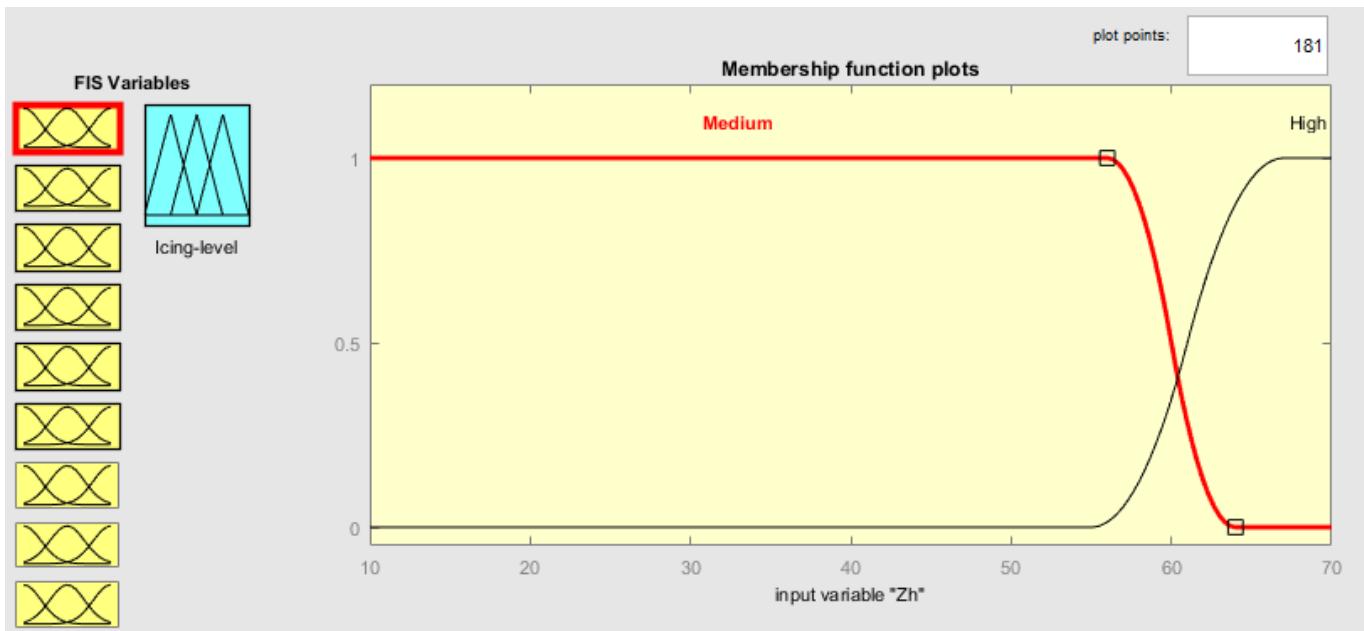


Рис. 4.10. Функції належності для параметра «РВ» на вході схеми нечіткого детектора та класифікатора рівня ЗНО

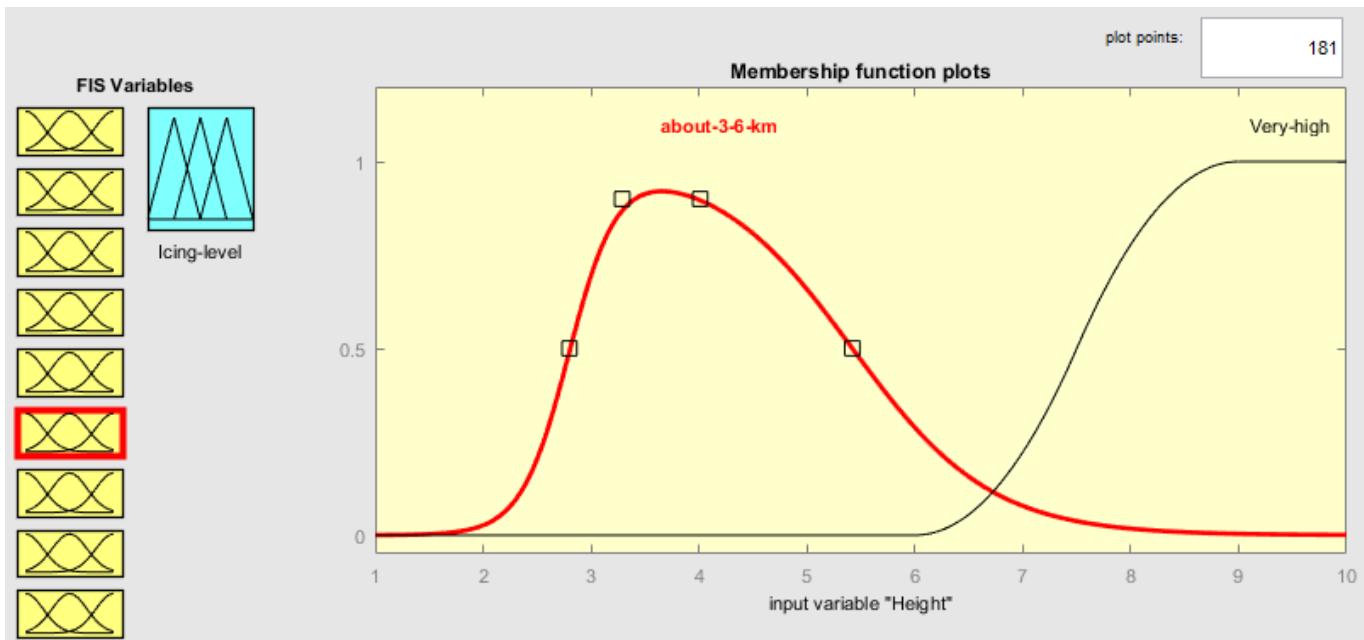


Рис. 4.11. Функції належності для параметру «Висота» на вході схеми нечіткого детектора та класифікатора рівня ЗНО

Межі діапазонів функцій належності для всіх вхідних параметрів обрано на основі інформації, що була наведена попередньо у розділах 1...3 цієї роботи.

Функції належності на виході нечіткого детектора та класифікатора ЗНО показано на рис. 4.12 [119, 121]. Входами нечіткого детектора та класифікатора ступеня небезпеки ЗНО є Z_H , Z_{DR} , LDR_{hv} , K_{DP} , $\rho_{hv}(0)$, висота об'єму спостереження h , швидкість польоту V , температура t^0 , час перебування у зоні небезпеки T , а вихід - одним з 5 класів: 1) *Unknown* – невідомо (недостатньо інформації для прийняття рішення); 2) *Absent* – відсутня небезпека обледеніння ПС; 3) *Light* – низька загроза обледеніння; 4) *Medium* – помірна загроза обледеніння, 5) *Strong* – очікується сильне обледеніння.

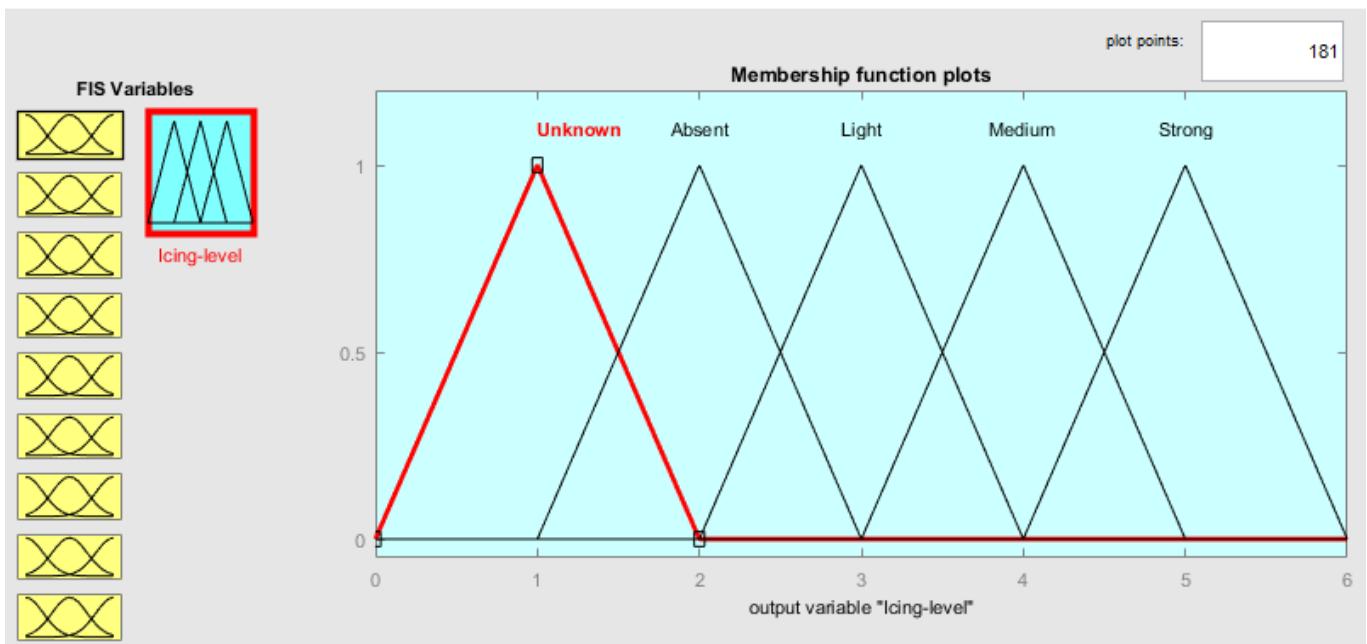


Рис. 4.12. На виході схеми нечіткого детектора та класифікатора отримуємо один з п'яти варіантів прогнозу щодо існування ЗНО

Схему прийняття рішень щодо наявності та ступеня загрози ЗНО для польоту ПС показано на рис. 4.13. Як можна бачити у правій частині рисунка, обрані діапазони значень поляриметричних вхідних змінних, висота польоту та температура метеорологічного об'єкта відповідають умовам існування переохолоджених рідких капель (детальніше про це у дод. 2); швидкість польоту недостатня для кінетичного нагріву корпусу ПС, час перебування у зоні небезпеки досить великий, тому розроблювана система попередження ЗНО діагностувала найвищий рівень небезпеки можливого обледеніння, який відповідає значенню вихідної змінної *icing-level* = 5. Зі

збільшенням швидкості польоту, зменшенням часу перебування у зоні можливого обледеніння, або в разі зміни поляриметричних параметрів відбитого сигналу, які відповідатимуть, наприклад, зоні танення, загроза обледеніння ПС зменшиться, і на виході детектора значення змінної *icing-level* буде зменшено до 4 або 3. У разі великого зростання швидкості (наприклад, понад 1000 км/год), або збільшенні температури до 15 °C та вище, або при певній комбінації поляриметричних змінних, що відповідатимуть зоні сильної зливи чи зоні кристалів льоду, умови обледеніння ПС не виконуватимуться, і на виході детектора значення змінної *icing-level* дорівнюватиме 2, що відповідає відсутності загрози. За невизначених чи суперечливих рівнів вхідних параметрів значення *icing-level* = 1, що може свідчити про збій у роботі бортового обладнання.

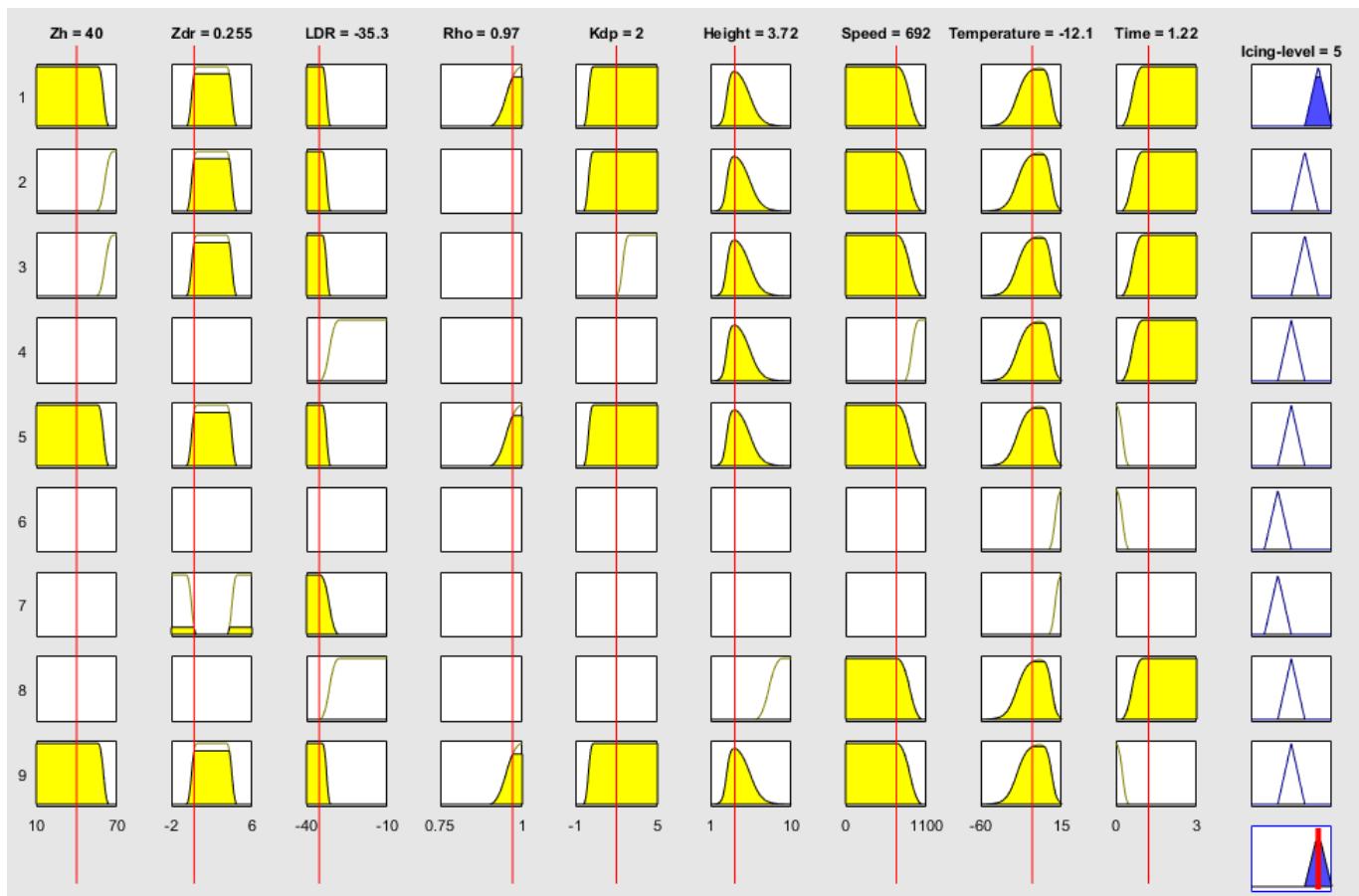


Рис. 4.13. Схема прийняття рішень про наявність та ступінь загрози існування ЗНО на основі функцій належності вхідних параметрів

Будову наведеного вище детектора та класифікатора ступеня загрози обледеніння на базі математичного апарату нечіткої логіки можна вдосконалити у майбутньому для пристосування системи до конкретного типу ПС з урахуванням його конструктивних особливостей, умов експлуатації, можливостями штатної протиоблідновальної системи та з допустимим рівнем обледеніння, який не призводить до виникнення авіаційної пригоди.

4.4. Структурно-логічна схема інформаційної технології виявлення зон потенційного небезпечного обледеніння повітряних суден

Структурно-аналітичну схему інформаційної технології виявлення зон потенційного небезпечного обледеніння повітряних суден у польоті показано на рис. 4.15. Як можна бачити з рисунка, зазначена інформаційна технологія складається із вперше розробленого у даній роботі *методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО*, що показано в розділі 2, удосконаленого через додавання нового класу об'єктів – зон небезпечного обледеніння – *методу визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи*, що подано в розділі 3, і вперше розробленого *методу багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння* на основі аналізу поляриметричних параметрів відбитого сигналу та параметрів ПС та маршруту польоту. Розроблена у роботі інформаційна технологія надає можливість розширити перелік небезпечних метеорологічних явищ, що може бути діагностовано в оперативному режимі під час польоту ПС, а отже, здатна підвищувати безпеку польотів.

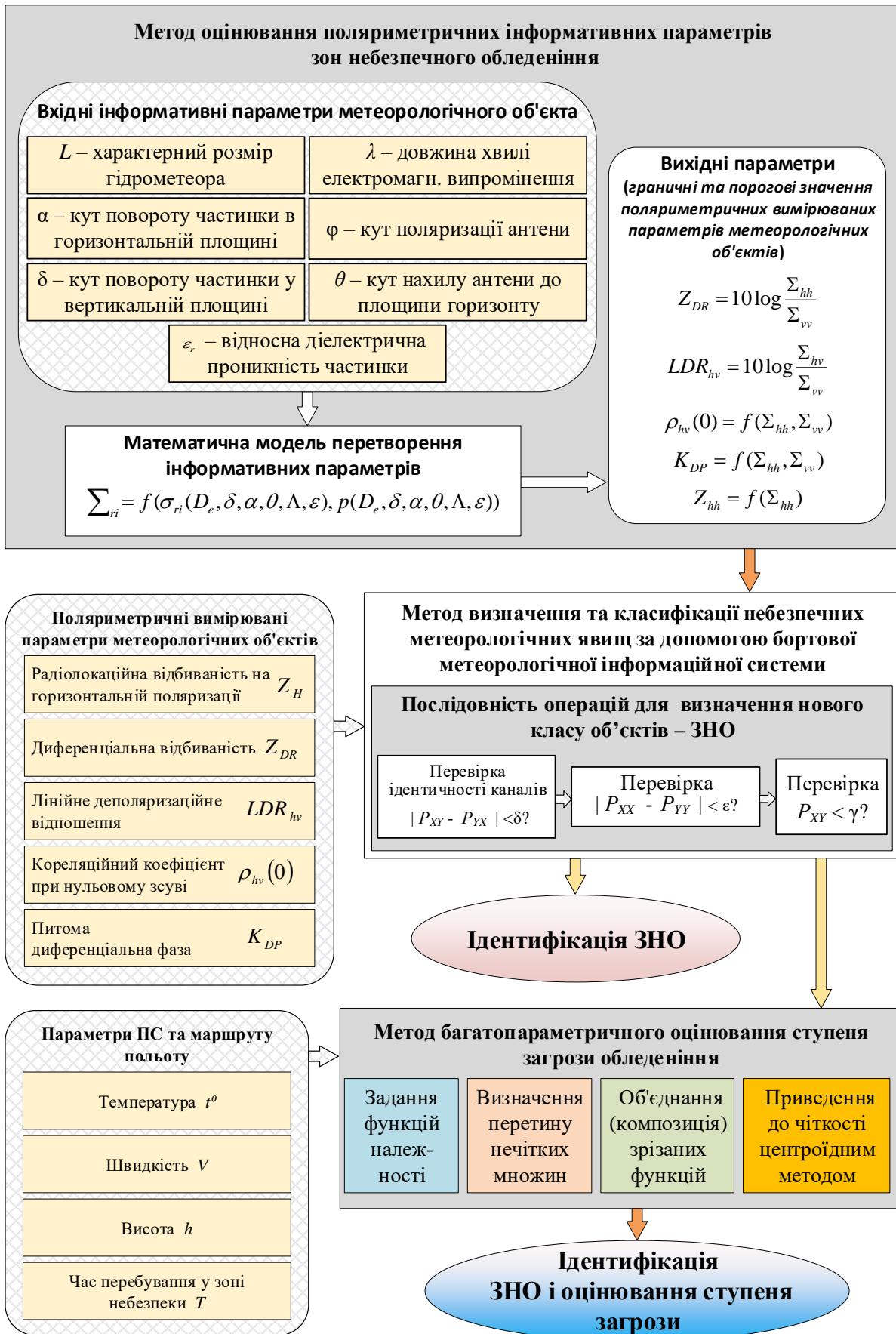


Рис. 4.14. Структурно-аналітична схема інформаційної технології виявлення зон потенційного небезпечної обледеніння повітряних суден

Висновки до четвертого розділу

1. У четвертому розділі вперше розроблено *метод багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння*, який використовує поляризаційні характеристики електромагнітних хвиль, відбитих від метеорологічних об'єктів, а також параметри літального апарату і маршруту польоту, що дозволило інтегрувати отримання інформації про очікувані метеорологічні умови польоту і підвищити якість управлінських рішень. Показано, що на основі лише одного параметра алгоритм ідентифікації ЗНО не може забезпечити достатньо високу ймовірність правильного визначення цілі та достатньо низьку ймовірність хибної тривоги відповідно до стандартів, що прийняті у цивільній авіації, тому рекомендовано використовувати багатокритеріальні методи оцінювання. Показано, що додатковими факторами можуть бути висота польоту ПС (найчастіше випадки обледеніння відбуваються на висоті 3...7 км), швидкість польоту (швидкість до 800...900 км/год є недостатньо великою, щоб уникнути загрози відкладень льоду в польоті через кінетичне нагрівання поверхні ПС під дією зустрічного потоку повітря), час перебування у зоні ризику (навіть ПС, обладнані системами боротьби з обледенінням не завжди і не на всіх елементах поверхні можуть успішно боротись з наростами льоду), тип хмари (не всі хмари несуть загрозу обледеніння або інших НМЯ), і в багатьох випадках є економічно доцільним і безпечним для літального апарату та екіпажу прокладати більш короткий маршрут польоту, спираючись на інформацію від бортової метеорологічної інформаційної системи.

2. Для реалізації *інформаційної технології виявлення зон потенційного небезпечного обледеніння ПС* запропоновано програмно-апаратний комплекс для визначення ЗНО на базі нечіткого класифікатора, що враховую поляриметричні параметри відбитого сигналу бортового поляриметричного радіолокатора та характеристики ПС і маршруту, такі як висота польоту, швидкість, час перебування у зоні небезпеки та ін. Показано, що програмно-апаратний комплекс виявлення ЗНО може розрізняти декілька рівнів небезпеки обледеніння, і його можна пристосувати до конкретного типу ПС. Запропоновано *інформаційну технологію виявлення зон*

потенційного небезпечного обледеніння ПС на базі методів виявлення ЗНО ПС під час польоту.

3. Безпосередній внесок автора полягає в розроблені способу виявлення ЗНО, класифікатора рівня загроз; запропоновано програмно-апаратний комплекс для його реалізації. На спосіб і пристрій отримано патенти України на корисну модель [10, 11].

Матеріали даного розділу відображені у таких публікаціях автора: [15, 18, 20, 23] і деяких інших роботах.

Список використаних джерел у четвертому розділі

108. Гейстер С. Р. Статистические характеристики спектрального портрета помех от дождевых облаков в сантиметровом диапазоне / С. Р. Гейстер // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2000. – 5, No 2. – С. 25–34.

109. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1984. – 531 С.;

110. Miller E.A., E.N. Kadygov., A.V. Troitsky, A.N. Shaposhnikov. Automatic measuring system for remote sensing monitoring adverse weather conditions. In book: Proceedings of the Fifth world congress “Aviation in the XXI-st century”, K.: 2012 том.2. – С. 3.7.120-3.7.124.

111. ICAO DOC 9640-AN/940 «Руководство по противообледенительной защите воздушных судов на земле». Издание второе – 2000, [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: http://airspot.ru/book/file/790/9640_cons_ru.pdf.

112. Перронные зарисовки [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: http://users.livejournal.com/_ant0n_1609168.html.

113. Stratus Clouds [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://www.weathergraphics.com/tim/arctic/990602f.jpg>.

114. Cumulonimbus [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: http://paraglide.org.ua/Articles/St12/clip_image007_1.jpg.

115. Атлас облаков [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL: <http://www.hmn.ru>.

116. Ледяной дождь [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL:

http://ru.wikipedia.org/wiki/Ледяной_дождь.

117. Тёплый фронт [електронний ресурс]. – Режим доступу: www/URL:
http://ru.wikipedia.org/wiki/Тёплый_фронт.

118. Hongping L. Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy System, and In Situ Verification / Hongping L. and Chandrasekar V. // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Volume 17, final form 27 Apr. 1999.

119. Van Tho Dang. Fuzzy Detection and Classification of Dangerous Hydrometeorological Phenomena Using Dual-Polarimetric Radar Measurements / Van Tho Dang, Yanovsky F.J. // Proceedings Signal Processing Symposium, Jachranka, Poland, 2009. CD ROM. PP. 1-4.

120. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. // –. М.: Фізмат. лит., 2001.

121. Pitertsev A. Identification of the meteorological objects on doppler-polarimetric radar data by using fuzzy logic based algorithm / Pitertsev A., Yanovsky F. // MMET-2006. – Х.: 26-29 червня 2006. – С. 344-346 (Scopus).

122. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / Information and control, 8, 1965. – PP 338-353.

123. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning / Information sciences. – 1975. – Т. 8. – №. 3. – С. 199-249.

Список публікацій здобувача за матеріалами четвертого розділу

124. Pitertsev A.A. Efficiency estimation for the parametric radar algorithm of detection of probable aircraft icing zones / Pitertsev A.A., Yanovsky F.J. // MMET-2014. – Д.: 26-28 серпня 2014. – С. 243-246 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено оцінку ефективності алгоритму визначення ЗНО за одним та двома інформативними параметрами.

125. Pitertsev A.A. Copula Based Dependence Measure for Polarimetric Weather Radar / Pitertsev A.A., Sinitsyn R.B., Yanovsky F.J. // International Radar Symposium (IRS-2015). – Дрезден, Німеччина: 2015. – С. 597-603 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено оцінку інформативних параметрів поляриметричного локатору за допомогою зв'язки незалежних статистичних параметрів.

126. Pitertsev A. Simulation of Microwave Backscattering on Hydrometeors / Pitertsev A., Yanovsky F. // Proc. Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications. – Vol.2. – Krakiv, Pol'sha: 2006. – C. 499-502 (Scopus).

Особистий внесок здобувача: наведено опис алгоритму ідентифікації небезпечних метеорологічних об'єктів з використанням поляриметричних даних та штучних нейронних мереж.

127. Yanovsky F.J. Neural Network Identification Algorithm for Weather Radar / Yanovsky F.J., Pitertsev A.A., Ostrovsky Y.P., Mazura I.V., Marchuk V.V. // Extended Abstracts Int. Symposium on Tropospheric Profiling ISTP7. – Boulder, штат Колорадо, США: 11-17 червня 2006. – Paper 6.2, C. 3.

Особистий внесок здобувача: наведено опис алгоритму ідентифікації метеорологічних об'єктів з використанням поляриметричних інформативних параметрів та штучних нейронних мереж та їх обробки.

128. Обнаружение зон потенциального обледенения самолетов при радиолокационном зондировании метеорологических объектов / Питерцев А.А. // X.: ИПЕ НАН журнал «Радиофизика и электроника». – 2006. – Том 11, № 1. – С. 74-77.

Особистий внесок здобувача: наведено опис алгоритму ідентифікації ЗНО з використанням поляриметричних інформативних параметрів метеорологічного радіолокатора.

ВИСНОВКИ

Розроблено інформаційну технологію виявлення зон потенційного обледеніння ПС під час польоту. Її основою є подана в роботі інформаційна система завчасного попередження потенційних загроз ПС, яку розроблено з урахуванням відповідності до концепції підвищення безпеки польотів. Результати, отримані в процесі дослідження, дають підстави вважати, що вони є адекватні, а цілі та завдання дисертаційної роботи виконано:

- 1) Уперше розроблено математичну модель відбиття поляризованих електромагнітних хвиль від метеорологічних цілей по курсу польоту ПС (9345...9375 МГц, $\lambda = 3,2$ см) на основі інформаційних параметрів сигналу отриманого з зони можливого обледеніння при різних кутах сканування, що дозволило підвищити якість оброблення метеорологічної інформації та досягти точності вимірювання різної форми кристалів хаотичної орієнтації з розмірами від 0,01 до 10 мм за теоретичних обмежень для лінійного деполяризаційного відношення у межах діапазону 14... -24 dB, для диференціальної відбиваності у діапазоні -4...4 dB, для коефіцієнта кореляції – у межах 0,8...1 dB.
- 2) Розроблено метод оцінювання поляриметричних інформативних параметрів ЗНО, у якому на відміну від існуючих методів враховуються результати математичного моделювання відбиття сигналів у різних станах зони, що дозволило більш точно розрізняти особливості простору сканування, що містить гідрометеори різних типів та зменшити складність обчислювальних розрахунків на 2–3 порядки.
- 3) Удосконалено метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи шляхом додавання процедури ідентифікації нового класу об'єктів – ЗНО, що дозволило інтегрувати отриману інформацію про очікувану загрозу обледеніння ПС у бортову інформаційну систему та на її базі підвищити якість управлінських рішень в оперативному режимі.
- 4) Уперше розроблено метод багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння, у якому використовуються поляризаційні характеристики

електромагнітних хвиль, відбитих від метеорологічних об'єктів, а також враховуються параметри повітряного судна і маршрут польоту, що дало змогу визначити п'ятий ступінь як найбільш небезпечний рівень загрози обледеніння за значень інформаційних параметрів, таких як радіолокаційна відбиваність понад 60 дБз, диференціальна відбиваність у межах 0,5...3,5 дБ, лінійне диференціальне відношення менше за -34 дБ, значення коефіцієнта кореляції більше ніж 0,95, висота польоту у межах 3...6 км, швидкість менша за 700 км/год, температура повітря у межах -20...0 °C і час перебування у зоні небезпеки більше ніж 0,5 години.

5) На основі розроблених моделей і методів вдосконалено інформаційну технологію підвищення ефективності функціонування інформаційних систем безпеки польотів ПС та створено програмно-апаратний комплекс, що надало можливість чіткого виявлення зон потенційного обледеніння під час польоту та підвищити якість оброблення інформаційних сигналів метрологічної обстановки, а саме: досягти оптимальних значень порога прийняття рішення про критичний стан у межах $F_0 = -0,4$ дБ для параметра ZDR, та $F_0 = -27$ дБ для параметра LDR з фіксацією ймовірності правильного виявлення небезпечних зон на рівні $D = 0,802$ і хибної тривоги відповідно на рівні $F = 1,6 \cdot 10^{-7}$.

ДОДАТОК 1

Теоретичні відомості про обледеніння як небезпечне метеорологічне явище

1.1. Вплив обледеніння на аеродинамічні якості літака і безпеку польотів

Обледенінням називається відкладення льоду в польоті на різних частинах літака. Воно має багато негативних факторів впливу на безпеку польоту ПС [111]. Так, обледеніння збільшує вагу літака, що особливо небезпечно при його максимальному завантаженні. Крім того, осідаючи на різного роду приймацах, наприклад, на приймацах повітряного тиску, лід спотворює показання ряду приладів, виводить з ладу системи керування і двигуни. Відкладаючись на гвинті, лід викликає втрату тяги і вібрацію гвинта. Обледеніння стойок антен може привести до їх поломки і, відповідно, до порушення зв'язку літака із землею. Покриті льодом стекла кабіни сильно ускладнюють захід на посадку і саму посадку. Однак головна небезпека обледеніння полягає в порушенні обтікання крила літака (рис. Д.1-1), що призводить до передчасного зриву потоку і втрати крилом підйомної сили, тобто літак втрачає свої аеродинамічні якості.

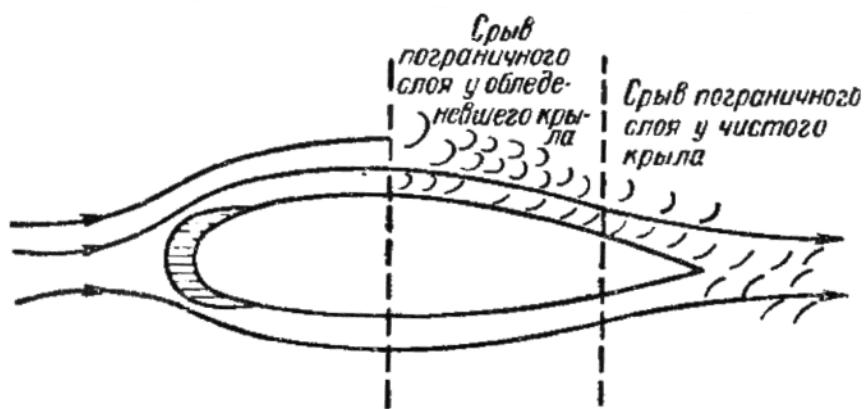


Рис. Д.1-1. Обтікання обледенілого крила повітряним потоком [41]

При обледеніння реактивних двигунів лід відкладається на поверхні вхідного каналу двигуна і безпосередньо на вході в компресор двигуна. Це призводить до зменшення витрати повітря внаслідок зменшення прохідного перетину, а також до зміни умов обтікання поверхонь у вхідному каналі, і, отже, до зниження коефіцієнта корисної дії компресора, появлі нестійкого режиму його роботи і помпажу.

Обледеніння вхідних елементів двигуна викликає збільшення витрати пального для підтримки відповідного числа обертів ротора компресора, зменшення тяги двигуна, а іноді і його зупинки. Лід, що потрапив в компресор, може зруйнувати двигун. У поршневих двигунів є небезпека обледеніння всмоктувальної системи карбюратора, яке може спостерігатися в хмарах і поза ними при великій вологості повітря. Цей вид обледеніння можливий при температурі зовнішнього повітря значно вище 0 °C (навіть при температурі +15 °C, а іноді і вище), оскільки в результаті розширення повітря, що надходить у карбюратор і випаровування пального температура у всмоктувальній системі може знизитися на 18... 20 °C [41].

1.2. Типи льоду і форма відкладень

Наведемо опис декількох найбільш поширених типів крижаних утворень, які спостерігаються на поверхні ПС у польоті [42]:

Прозорий, або склоподібний, лід утворюється при польоті у зоні переохолодженого дощу, мряки, під хмарами або в хмарах, що складаються з великих переохолоджених крапель. Суцільна водяна плівка, що утворюється з крапель, що розпливаються по поверхні літака, замерзає, перетворюючись у гладкий шар прозорого льоду. Такий лід міцно тримається на поверхні і тане лише при польоті у повітрі з позитивною температурою.

Прозорий лід не дуже сильно спотворює профіль несучих поверхонь літака і не є небезпечним, якщо його товщина не надто велика. Однак в зоні переохолодженого дощу, коли льодоутворення відбувається дуже швидко, лід стає шорстким і дуже сильно спотворює аеродинаміку обтікання крила.

Відкладення прозорого льоду можуть відбуватися при температурі 0...-10 °C, але найчастіше при температурі 0...-5 °C [41].

Матовий, або змішаний, лід (рис. Д.1-2) зустрічається найбільш часто і виникає при польоті у змішаних хмарах, де поряд з дрібними переохолодженими краплями є крижані кристали і сніжинки. Дрібні краплі, стикаючись з літаком, відразу ж замерзають не розтікаючись, більші спочатку розтікаються, а потім замерзають [42, 41]. Матовий лід іноді називають порцеляновим, непрозорим або малопрозорим.

Він швидко і нерівномірно осідає на частинах літака, що виступають, а іноді і на інших (головки заклепок, болтів, антени і т. п.), та утворює шорстку поверхню неправильної форми. При такому вигляді обледеніння спотворюється обтічна форма літака, а лід дуже міцно тримається на його поверхні.



Рис. Д.1-2. Обледеніння на передній кромці кіля і стабілізатора літака АН-148 [112].

Матовий лід значно погіршує льотні якості літака, і тому відноситься до найбільш небезпечного виду обледеніння. Утворюється при температурах від 0 до -20°C , але найчастіше при температурах від -5 до -10°C .

Білий крупообразний, або молочний, лід відкладається при польоті в хмарах, що складаються з дрібних переохолоджених крапель. Являє собою порівняно рівний покрив пористої структури. Утворюється внаслідок замерзання дрібних переохолоджених крапель, які при ударі об поверхню літака зберігають свою сферичну форму і не розтікаються. Цей лід утворюється при польоті у хмарах, що складаються з однорідних, дуже дрібних водяних крапель. Він пористий, не надто щільно пристає до поверхні літака, тримається на поверхні не міцно і при вібраціях може відколюватися. Білий крупообразний лід утворюється при температурі нижчої за -10°C [41, 42].

Паморозь – білястий, зернистий наліт – менш небезпечний вид обледеніння, утворюється при температурах $-15\dots-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижче, осідає більш рівномірно на поверхні літака і не завжди тримається міцно. Тривалий політ у зоні де утворюється паморозь є небезпечним [41].

Іній – легкий кристалічний наліт, утворюється в результаті сублімації водяної пари на значно переохолодженої поверхні літака. Під дією вібрації і зустрічного повітряного потоку легко сколюється і здувається. Цей вид обледеніння може утворитися при польоті поза хмар, коли літак потрапляє з більш холодного в менш холодне і вологе повітря, що має температуру нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, наприклад, при швидкому зниженні. Іній сам по собі не представляє небезпеки для літака, однак при потраплянні літака в переохолоджену хмару він може служити основою для його інтенсивного зледеніння. До того ж, утворення інію на лобовому склінні кабіни погіршує огляд, що особливо небезично під час посадки [41].

Форма крижаних відкладень також може бути досить різноманітною. Розрізняють декілька основних форм: профільну (рис. Д.1-3, а)), шпилястої (рис. Д.1-3, б)), жолобкову (рис. Д.1-3, в)) і крижані відкладення невизначеної форми.



Рис. Д.1-3. Відкладення льоду профільної (а) і шпилястої (б) форми [41]



Рис. Д.1-3 (в). Відкладення льоду жолобкової форми [41]

Форма крижаних відкладень на поверхні літака залежить від швидкості польоту, розміру водяних крапель і температури в хмарі.

Під час руху літака внаслідок стиснення повітря перед лобовим частинами і тертя частинок повітря про його поверхню температура в критичних точках¹ збільшується, особливо на передній кромці крила і лобових частинах літака, де майже вся кінетична енергія перетворюється у теплову [42].

Якщо температура повітря досить низька, а швидкість літака не забезпечує підвищення температури в критичних точках вище 0 °C, то краплі замерзають на виступаючих деталях літака. В результаті може утворитися шар льоду, що повторює форму обледенілої поверхні (профільне обледеніння), або шпиллястий крижаний наріст (рис. Д.1.3, б)). Такі крижані відкладення мало впливають на аеродинамічні умови обтікання поверхні літака повітряним потоком і найменш небезпечні.

Якщо температура повітря така, що швидкість літака забезпечує підвищення температури в критичних точках вище 0 °C, то на передній кромці крила літака утворюється жолобковий лід: краплі, що потрапляють на кромку або на інші виступаючі деталі, замерзають не в критичних точках, а на деякій відстані від них, утворюючи два виступаючих ребра (рис. 1.3, в)). Жолобковий лід сильно спотворює профіль крила і значно погіршує аеродинамічні якості літака. Такий вид обледеніння є найбільш небезпечним.

При температурі повітря близької до 0 °C на поверхні літака, що піддалась обледенінню, утворюється плівка води, яка переміщається повітряним потоком вздовж виступаючих частин і може замерзнути поза зоною осідання крапель, наприклад, на робочій площині крила або інших місцях [41].

Найбільшу небезпеку обледеніння представляє для гелікоптерів. У них до обледеніння схильні головний і хвостовій гвинти, а в горизонтальному польоті – ті ж деталі, що і на літаку. Наростання льоду на лопатях несучого гвинта відбувається дуже швидко і нерівномірно, що призводить до різких коливань лопаті, які передаються всієї конструкції гелікоптера і викликають великі вібрації її частин [42].

¹Критичні точки - елементи конструкції ПС, на яких відбувається найбільше гальмування зустрічного повітряного потоку. В них утворення льоду зустрічається найбільш часто.

Обледеніння гелікоптерів найчастіше спостерігається при температурі від 0 до -12 °C.

1.3. Вплив параметрів ПС та навколошнього середовища на можливість обледеніння

Розглянемо параметри літака і навколошнього середовища, які можуть сприяти або, навпаки, перешкоджати обледеніння літака у помірному материковому кліматі [42]:

Температура повітря. За рідкісним винятком, обледеніння відбувається в діапазоні 0...-40 °C, причому переважна більшість випадків – при температурі 0...-15 °C [41]. Якщо температура навколошнього повітря негативна, але вища за температуру літака (що може мати місце при зміні літаком висоти або перетині ним кордону повітряних мас з різною температурою), то за інших рівних умов імовірність обледеніння підвищується, а якщо обледеніння вже почалося, то така різниця температур ще більше його посилила [41, 42].

Вологість повітря. Очевидно, що чим вище відносна вологість, тим більше ймовірність того, що в повітрі з'явиться конденсат. Якщо відносна вологість повітря наближається до одиниці, то це означає, що ПС знаходиться в зароджується хмарі. При негативних температурах цей конденсат буде осідати на поверхні ПС [42].

Водність. Оскільки отримати достовірне миттєве значення цього параметра технічно досить складно, його зазвичай усереднюють на великій ділянці шляху повітряного судна, протяжністю декілька кілометрів. Чим вище водність повітря, тим більша ймовірність обледеніння і важче його ступінь. Однак на інтенсивність в цьому випадку впливає головним чином не спільна водність хмари, а кількість води в рідкому вигляді в одиниці об'єму [42]. Зі зниженням температури повітря знижується і водність. При температурі нижчої за -15 °C повторюваність локальних ділянок з високою водністю на маршруті руху ПС різко зменшується і ймовірність обледеніння також різко падає. Дослідним шляхом встановлено, що для початку процесу обледеніння достатнім є значення водності більше 0,2 г/м³ [46].

Розмір крапель. При однаковій вологості хмар різним може бути середній розмір крапель в них, а значить, і рівень водності: чим більше середній діаметр

крапель в хмарі тим більше водність і, отже, більш сильним буде обледеніння. Мінімальний середній розмір краплі, при якому можна говорити про помітний процесі утворення крижаного покриву становить близько 30 мкм [46]. Дослідження причин льотних пригод показали, що раніше недооцінювалася небезпека крапель діаметром 200... 600 мкм. Маючи великий об'єм, вони не замерзають миттєво і розтікаються по великій площі, утворюючи найбільш небезпечний вид льоду: прозорий жолобообразний. Великі краплі розтікаються далеко за межі розрахункової зони захоплення крапель на крилі і можуть привести до істотних змін форми крила і порушення роботи механізації крила [42, 111]. Очевидно, що якщо ПС буде обходити зони, що містять великі незамерзаючих краплі, то форма і товщина льоду, що утворився на корпусі ПС будуть менше впливати на його льотні якості.

Форма хмар. Найбільш часто (в 85% випадків) обледеніння відбувається у шаруватих і шарувато-купчастих хмараах.



Рис. Д.1-4. Шаруваті хмари [113]

Інтенсивність обледеніння в них може досягати 4...5 мм/хв і буває найбільшою у верхній межі хмари [41]. Ці хмари відрізняються підвищеною водністю, оскільки опади з них не випадають або бувають слабкими (мряка), а зсередини вони виглядають темної щільною масою [41].

Шаруваті хмари (Stratus, St, рис. Д.1-4) являють собою області туману на висоті або у землі, утворені через охолодження поверхні землі. Шаруватим може бути також хмара що лежить на горі. Також шаруваті хмари можуть бути утворені в результаті опускання шарувато-купчастих хмар.

Шарувато-купчасті хмари (Stratocumulus, Sc, рис. Д.1-5) утворюються через турбулентність і конвекції в нестабільних, перенасичених вологою повітряні маси або через перетворені інших видів хмар, наприклад, дощових або шаруватих, а також через поширення купчастих хмар.



Рис. Д.1-5. Шарувато-купчасті хмари [114, 115]

У купчасто-дощових хмараах (Cumulonimbus, Cb, рис. Д.1-6) імовірність обледеніння становить близько 70%, а інтенсивність зледеніння може досягати 5 мм/хв. Ці хмари утворюються, по-перше, з купчастих хмар, які отримали надмірне розвинення. По-друге, причиною їх утворення може викликати холодний фронт, який зіткнувся із теплим повітрям. Крім того, це зіткнення може викликати утворення грози. Підстава такої хмари може знаходитися на висоті 0,4...1 км [41]. У купчасто-дощових хмараах сильні висхідні потоки безперервно закидають переохолоджені краплі на всю товщу хмари, і тому інтенсивне зледеніння може відбуватися також у всій його товщі аж до самої верхньої частини, ковадла.



Рис. Д.1-6. Купчасто-дощові хмари [115]



Рис. Д.1-7. Шарувато-дощові хмари [115]

У *шарувато-дощових* (Nimbostratus, Ns, рис. Д.1-7) і *купчастих* (Cumulus, Cu, рис. Д.1-8) хмарах імовірність обледеніння становить 60%, а швидкість утворення льоду 0,5...2 мм / хв. Шарувато-дощові хмари приносять дощ або сніг.

Купчасті хмари (рис. Д.1-8) є класичними термічними хмарами (тепле повітря піднімається вгору і конденсується при досягненні точки роси). Чим сухіше повітря,

тим вище хмари, ніж вологіше - тим хмари ширше і більше. Якщо повітря тепле і вологе, то утворюються купчасто-дощові хмари. Ці хмари виникають на висоті до 1,5 км, в горах – до 6 км. Спостерігаються такі хмари в основному в теплу пору року. З'являються вранці, розвиваються протягом дня, а до вечора зазвичай розпадаються. Їх називають «хмарами гарної погоди».



Рис. Д.1-8. Купчасті хмари [115]

У *високо-шаруватих хмарах* (Altostratus, As, рис. Д.1-9) імовірність обледеніння найменша – близько 30%, швидкість обледеніння невисока – 0,4…0,8 мм/хв.



Рис. Д.1-9. Високо-шаруваті хмари [115]

Такі хмари утворюються на навітряних схилах гірських хребтів. Якщо на гори натикає потужний потік вологого повітря, то утворення високо-шаруватих хмар відбувається головним чином на навітряних схилах. Такі хмари потім розростаються вгору до великих висот [50].

Узагальнена інформація по основних типів хмар приведена на рис. Д.1-10.



Рис. Д.1-10. Основні форми хмар і їх середня висота [41]

Розглядаючи агрегатний стан хмар, слід зазначити, що найбільш небезпечне і інтенсивне зледеніння буває в зонах переохолодженого дощу і в хмарах з великими переохолодженими краплями. У змішаних хмарах інтенсивність обледеніння і його ймовірність менше, а в чисто кристалічних хмарах ймовірність обледеніння незначна [41].

Розглянемо тепер фактори, пов'язані з ПС, які впливають на інтенсивність зледеніння:

Висота польоту. Як зазначалося раніше, інтенсивність обледеніння залежить від розміру крапель, який змінюється по висоті хмари і, крім того, залежить від типу хмари. Величина водності і розподіл крапель різних розмірів за об'ємом хмари залежать від його форми: в купчастих хмарах найбільші краплі зосереджені в центрі, у фронтальних вони рівномірно розподілені по висоті хмари, так само, як і максимальна водність. У шаруватих хмарах водність зростає з висотою, досягає максимуму у верхній третині і потім різко падає біля його верхнього краю. Від висоти також залежить і можливість обледеніння. Так, максимальна ймовірність (блізько 30%) при інших рівних умовах відповідає висоті польоту 3000 метрів і знижується до значення 5% на висотах 1000 і 6000. метрів. Форма наведеної на рис. Д.1-11

залежності ймовірності обледеніння від висоти польоту пояснюється якраз тим, що обледеніння, як правило, відбувається в купчасто-дощових і купчасто-дощових хмарах, верхні краї яких розташовуються на висоті 2...4 км.

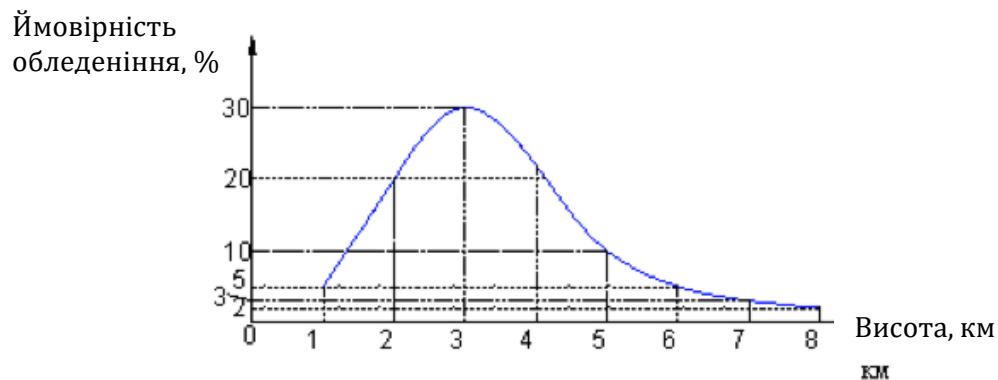


Рис. Д.1-11. Залежність ймовірності обледеніння від висоти польоту [45]

За іншими даними [38], обледеніння літаків може відбуватися у проміжку висот від 0 до 10...12 км, проте у 80% випадків воно буває на висотах до 4 км. Попадання літаків і гелікоптерів в зону переохолодженого дощу призводить до самого інтенсивного зледеніння ($J \geq 5\text{мм} / \text{хв}$). Ширина зони дощу, в якій відбувається обледеніння, може становити 100...200 км [38].

Швидкість польоту. Найбільше число випадків обледеніння спостерігається при швидкості літака менше 600 км/год (блізько 90% випадків), особливо при 400...500 км/год. При швидкості більше 600 км/год випадки обледеніння вкрай рідкісні, а при швидкості вище 800 км/год малоймовірні [41]. Для пояснення цих даних розглянемо процес зіткнення крапель з виступаючими частинами літака (рис. Д.1-12), наприклад, крилом, хвостовим оперенням, кілем і ін.

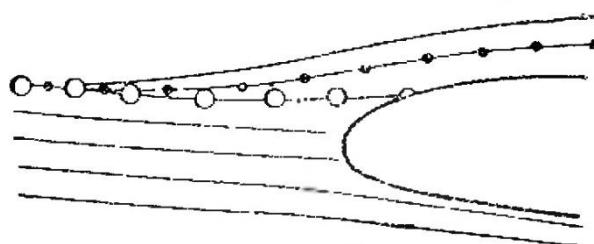


Рис. Д.1-12. Обтікання крила повітряним потоком, в якому знаходяться дрібні (точки) і великі (кола) водні краплі [41]

При усталеному русі літака частинки повітря, обтікаючи крило, рухаються по лінії потоку. Повітряний потік ще до підходу до профілю розділяється на дві частини – верхню і нижню, і зникається за крилом. Разом з повітрям рухаються і переохолоджені краплі. Спочатку вони переміщаються прямолінійно і лише там, де лінії струму викривляються, огинаючи профіль крила, краплі по інерції, прагнучі зберегти свій рух, відхиляються від лінії потоку (рис. Д.1-12) і осідають на передній кромці крила. Чим більша краплі, тим більш спрямованою буде їх траєкторія (внаслідок більшої сили інерції) і тим більше їх осяде на виступаючої поверхні крила. Дрібні краплі захоплюються повітряним потоком і разом з ним огинають профіль крила. При збільшенні швидкості польоту до 400-500 км/год зростає інтенсивність зледеніння через збільшення кількості крапель, які стикаються з поверхнею літака: по-перше, зростає об'єм повітря, що обтікає літак в одиницю часу, а по-друге, збільшується сила інерції і все дрібніші краплі осідають на частинах літака [41].

З іншого боку, як було наведено вище, із збільшенням швидкості відбувається кінетичний нагрів поверхні, особливо лобових частин літака, а в критичних точках до температури [42]:

$$T_{cr} = T_{air} + \Delta T, \quad (5.1)$$

де T_{air} – температура забортної повітря; ΔT – різниця температур корпусу літака в критичних точках і забортного повітря.

Величину підвищення температури ΔT в критичній точці в безхмарному просторі можна обчислити за формулою [41]

$$\Delta T \approx \frac{V^2}{2000}, \quad (5.2)$$

де V – швидкість літака, м/с.

Для бічних поверхонь літака підвищення температури становить близько 50% від ΔT . При польоті в хмарах кінетичний нагрів зазвичай буває менше, ніж під час польоту в безхмарному просторі, оскільки краплі, осідаючи на поверхні літака,

частково випаровуються, знижуючи температуру. Нагрівання в цьому випадку становитиме близько 60% від нагрівання, що має місце в безхмарному просторі. величина ΔT в критичних точках при різних швидкостях літака видно з табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Значення ΔT в критичних точках при різній швидкості (по приладу літака) польоту в хмараах і поза ними [42]

Показник		Швидкість польоту літака, км/год								
		200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$\Delta T, ^\circ C$	Поза хмар	2	4	7	10	14	19	25	31	39
	У хмараах	1	2	4	7	10	13	17	21	26

Таким чином, температура поверхні літака при певній його швидкості може бути вище температури навколошнього простору навіть на тих висотах, де вона значно нижче 0 °C. Внаслідок цього нижній рівень зони польотів, що представляє загрозу з точки зору можливого обледеніння швидкісних літаків, не збігається з висотою розташування ізотерми 0 °C в хмараах, а розташовується вище її на величину Δh , Причому тим вище, чим більше швидкість літака, що видно з табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Значення перевищення рівня можливого обледеніння щодо ізотерми 0° С при різній швидкості літака [42]

V, Км / год	200	300	400	500	600	700	800
$\Delta h, м$	150	350	600	1000	1400	1900	2500

При збільшенні швидкості польоту до 700 км/год і більше через адіабатичне стиснення повітря відбувається його нагрівання і часткове танення льоду [43].

Профіль крила. Встановлено, що тонкі крила вкриваються льодом більш інтенсивно, ніж товсті. Це пояснюється тим, що чим тонше профіль крила, тим більше від його поверхні відбувається поділ зустрічного потоку, що набігає, і тим більше до передньої кромці крила наближається місце поділу потоку. В такому випадку лінії струму, оточуючі крило, стають більш крутими, інерційні сили крапель

— великими, отже, майже всі краплі (великі і малі) осідають на тонкому ребрі крила. Цим же пояснюється і той факт, що лід швидше за все з'являється на таких деталях, як стійки, приймач швидкості, антени і т. д. [42].

Час перебування літака в зоні обледеніння. Навіть при невеликій інтенсивності обледеніння кількість відкладень льоду на поверхні літака буде тим більше, чим довше літак перебуватиме у переохолоджених хмарах. Таким чином, при тривалому польоті навіть при слабкій інтенсивності обледеніння, відкладення льоду можуть прийняти загрозливих розмірів [42].

Підсумовуючи написане, зазначимо, що на інтенсивність обледеніння може впливати безліч параметрів зовнішнього середовища і самого ПС. Однак можна виділити три необхідних і достатніх фактори, виявивши які можливо діагностувати зону потенційного обледеніння ПС, а саме: наявність як мінімум негативної температури повітря, наявність водних крапель з досить великим середнім діаметром, і достатньо велике значення середньої водності хмари (більше деякого порога). В роботі [46] наводяться, наприклад, такі значення: 30 мікрон — середній діаметр крапель і $0,2 \text{ г/м}^3$ — середній рівень водності. Ці метеорологічні параметри можуть бути вимірювані безпосередньо з борту ПС, що говорить про те, що існує можливість розробити спеціальний алгоритм для визначення зон можливого обледеніння безпосередньо по ходу маршруту польоту ПС в режимі реального часу.

1.4. Боротьба з обледенінням. Протибліднююальні системи

Прийнято розрізняти активні і пасивні способи боротьби з обледенінням ПС.

Пасивний спосіб боротьби з обледенінням полягає у виході із зони обледеніння і виборі відповідного профілю польоту. Так, при польотах у період теплої половини року інструкція [44] наказує пілотові знизитись у шар хмарності з позитивною температурою, а в період холодної половини року — набрати висоту в область більш низьких температур. Перехід на іншу висоту необхідно виконувати з максимальною можливою вертикальною швидкістю. Якщо при зміні висоти польоту обледеніння не припиняється і продовжується політ небезпечно, командир екіпажу зобов'язаний негайно здійснити посадку [44].

Активний спосіб боротьби передбачає застосування протиобліднювальних пристройів і є більш ефективним, ніж пасивний.

Для сучасних реактивних літаків при горизонтальному польоті активним способом боротьби з обледенінням може служити також маневр швидкістю, що особливо ефективно для літаків, що мають великий запас швидкості. При початку обледеніння форсування швидкості збільшує кінетичний нагрів. Коли температура в збуреному потоці і на поверхні літака виявляється позитивною, видалення льоду що утворився відбувається протягом 1...2 хв [42].

Зупинимося трохи докладніше на протиобліднювальних пристроях, якими обладнані сучасні повітряні судна [111].

Протиобліднювальна система літака (гелікоптера) – сукупність взаємодіючих технічних засобів, що попереджають обледеніння, або забезпечують видалення льоду з поверхонь, що захищаються літака (гелікоптера).

За принципом організації роботи розрізняють наступні види систем:

Протиобліднювальна система постійної дії у включеному стані не допускає утворення льоду на поверхні ПС, що захищається.

Протиобліднювальна система циклічної дії у включеному стані допускає утворення льоду безпечних розмірів і забезпечує періодичне видалення його з поверхні ПС, що має бути захищеною.

За принципом дії розрізняють наступні види протиобліднювальних систем:

- *Повітряно-теплова протиобліднювальна система* забезпечує видалення льоду або попереджає його освіту шляхом нагрівання поверхні за допомогою гарячого повітря.
- *Електротеплова протиобліднювальна система* забезпечує видалення льоду або попереджає його освіту шляхом електронагріву поверхні ПС.
- *Електроімпульсна протиобліднювальна система* забезпечує видалення льоду шляхом пружної деформації металевої обшивки, створюваної за допомогою імпульсного електродинамічного впливу.
- *Рідинна протиобліднювальна система* забезпечує видалення льоду або попереджає його освіту за допомогою нанесення рідини [111].

На сьогоднішній день прийнята така класифікація протиоблідновальних систем: існують механічні, хімічні, теплові і комбіновані протиоблідновальні системи [42]:

- *Механічні протиоблідновальні системи* засновані на видаленні льоду за допомогою пульсуючих гумових повітряних камер (рис. Д.1-13), встановлених в місцях обледеніння, або вібрацій обшивки під впливом електромагнітного поля. Розширення гумових накладок відбувається за допомогою пневматичного приводу.

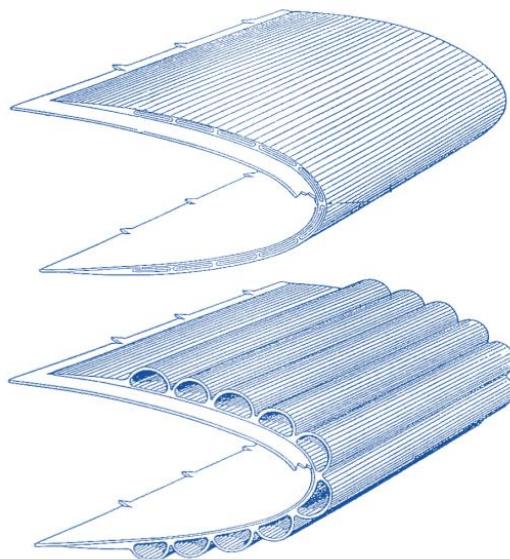


Рис. Д.1-13. Ілюстрація принципу дії механічної системи видалення льоду з передньої кромки крила літака [44]

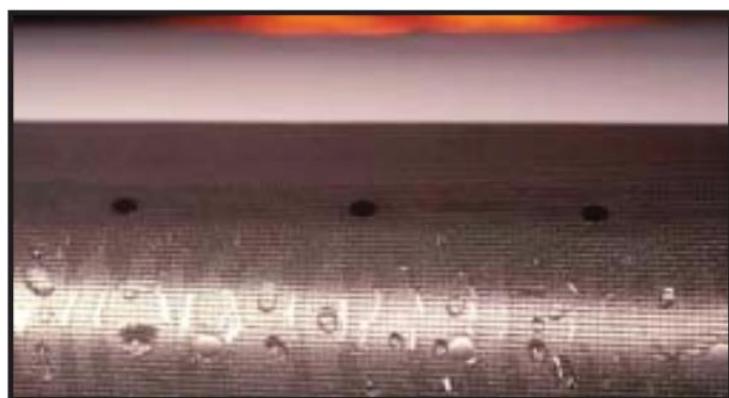


Рис. Д.1-14. Подача рідин що розчиняють лід через спеціальні отвори на передній кромці крила літака [44]

- *Хімічні протиоблідні системи* засновані на дії рідин, що розчиняють лід або знижують температуру замерзання води (гліколеві сполуки, етиловий спирт, спирто-гліцеринові суміші і ін.), які подаються через пористий матеріал, що покриває поверхню, що захищається (рис. Д.1-14). Можливе використання розчинних покриттів, від яких лід тане і скидається повітряним потоком.
- *Теплові (Термічні) протиоблідні системи* засновані на постійному обігріві поверхні, що захищається, або на періодичному підплавленні льоду, що здувається потім з поверхні повітряним потоком.
- *Комбіновані* пристрої являють собою поєднання описаних вище пристрій. Найбільш широко застосовуються повітряно-теплові та електротеплові протиоблідні системи. У повітряно-теплових протиоблідні системах із внутрішньої сторони поверхні, що захищається (наприклад, у носку крила) прикріплюється друга, зазвичай гофрована, обшивка, і в канал, що утворився подається тепле повітря. Основною частиною електротеплових протиоблідні систем є нагрівальні елементи – дротяні, у вигляді металевої сітки, напиляного шару металу і т. п. (рис. Д.1-15).



Рис. Д.1-15. Пристрій електричного обігріву вітрового скла [44]

1.5. Приклади авіаційних подій, пов'язаних з обледенінням

Наведемо приклад однієї з останніх авіаційних подій, що сталася 14 лютого 2009 р. Ось як виглядає повідомлення про нього інформаційних агентств [47]:

«ВАШИНГТОН, 14 лютого. Екіпаж літака, що розбився в штаті Нью-Йорк, в результаті чого загинуло 50 осіб, незадовго до краху помітив «значне обледеніння»

на крилах повітряного судна. Про це заявили експерти, які ведуть розслідування причин аварії, передає ВВС. Аналіз даних «чорних ящиків» показав, що за кілька секунд до того, як впасти на житловий будинок, літак кілька разів перекинувся. Рейс 3407 лише трохи не долетів до аеропорту Буффало. Представник Управління США з безпеки на транспорті Стів Чілендер заявив, що зараз на місці аварії працюють рятувальники, які намагаються дістати з-під уламків тіла загиблих. Жертвами аварії стали 45 пасажирів (в тому числі один з пілотів тієї ж авіакомпанії, яка здійснювала рейс), чотири члени екіпажу і один мешканець будинку, в який врізався літак. 50-місцевий Bombardier Dash 8 Q400, що належав авіакомпанії Colgan Air, здійснював рейс з розташованого недалеко від Нью-Йорка аеропорту Ньюарк в міжнародний аеропорт Буффало. Під час польоту ніяких тривожних повідомлень від пілотів на землю не надходило, це підтверджують записи переговорів екіпажу з диспетчерами.

Однак, за словами Чілендера, бортовий самописець, розташований в кабіні пілотів, зафіксував переговори про майбутню посадку в Буффало, в якому члени екіпажу згадували сніг і туман. На висоті 16 тисяч футів (блізько 5 км) пілоти відзначили погіршення видимості і запросили дозвіл знизитися до 12 тисяч футів (блізько 3,5 км). Дозвіл на зниження було отримано. Як розповів Чілендер, відразу ж після цього пілоти почали говорити про «значне обледеніння» скла кабіни і передньої частини крил. Він також зазначив, що система боротьби з обмерзанням була включена на літаку ще до того, як почалося обговорення цієї проблеми. За одну хвилину до закінчення записів літак випустив шасі. Ще через 20 секунд за допомогою необхідної комбінації закрилків пілоти почали знижувати швидкість. Протягом декількох секунд після того, як закрилки прийшли в рух, літак «кілька разів нахилився і перекинувся», сказав Чілендер. «Чорні ящики» ще встигли зафіксувати, як пілоти намагалися прибрати шасі і випрямити курс, проте на цьому записи обриваються. Як розповів співробітник аеропорту Буффало, «літак просто пропав з екранів радара». Очевидці стверджують, що падаючий літак вдавав дивний звук... ».

ДОДАТОК 2

Комбінації гідрометеорів, що становлять підвищену небезпеку обледеніння ПС [2, 102]

2.1. Класифікація

Як було показано в попередніх розділах, для виявлення умов можливого обледеніння ПС під час польоту можна скористатися інформацією від бортового метеорологічного радіолокатора для ідентифікації типу гідрометеорів і їх класифікації на небезпечні (переохолоджені краплі, дощ) і безпечні (кристали льоду, сніг). При цьому окремим питанням може стати розрахунок відбитого сигналу від сукупності гідрометеорів різних типів. Для розгляду цього питання необхідно заглибитися в фізику процесів, що відбуваються в атмосфері, щоб зрозуміти які комбінації гідрометеорів в хмарі можуть бути більш поширеними, а які малоймовірними. Процес обледеніння ПС більш імовірний при одному поєднанні зовнішніх умов, включаючи тип гідрометеорів в хмарі, температуру, вологість і менш вірогідний при іншому. Щоб навчитися визначати з достатньою для практичного застосування надійністю наявність умов небезпечного обледеніння, розглянемо коротко основні фізичні аспекти формування цих умов. Як приклад можна взяти класифікацію умов обледеніння, прийняту для функціонування системи попередження обледеніння літаків ADWICE [102]. Передбачається, що можна виділити чотири основні сценарії, або спосібу утворення льоду на поверхні ПС під час польоту [2]:

- *сценарій переохолодженого дощу (freezing rain regime)*
- *сценарій шаруватого обледеніння (stratiform icing regime)*
- *сценарій конвективного обледеніння (convective icing regime)*
- *сценарій загального обледеніння (general icing regime)*

Розглянемо більш детально кожен з цих сценаріїв.

2.2. Сценарій переохолодженого дощу [102, 116]

Переохолоджений дощ (або такий, що заморожує, *freezing rain*) – метеорологічне явище, при якому спостерігається випадання рідких опадів при мінусовій температурі повітря в точці спостереження. Як різновид, можна згадати крижаний дощ – тверді атмосферні опади, що випадають при мінусовій температурі повітря (найчастіше 0...-10 °C, іноді до -15 °C) у вигляді твердих прозорих кульок льоду діаметром 1...3 мм. Всередині кульок знаходиться незамерзла вода - падаючи на предмети, кульки розбиваються на шкарлупки, вода витікає і утворюється ожеледь [116]. Ефект переохолодженого дощу можна бачити на рис. Д.2-1.



Рис. Д.2-1. Гілки дерев, вкриті крижаним нальотом, як наслідок впливу переохолодженого дощу [116]

Основна причина утворення переохолодженого дощу, що представляє загрозу безпеці ПС – це температурна інверсія повітряних мас [117]. При поширенні теплого атмосферного фронту може виникнути ситуація, коли холодні повітряні маси з температурою нижче нуля витісняються більш теплими, температура яких вище 0 °C. Більш тепле повітря має меншу щільність, легше, тому воно виявляється зверху, як би ковзає по нижньому, холодному і важкому шару. Точніше, тепле повітря,

переміщаючись в бік холодного, натикає на клин холодного повітря, робить висхідне ковзання уздовж цього клину і динамічно охолоджується. На деякій висоті, яка визначається початковим станом висхідного повітря, досягається насичення – це рівень конденсації. Вище цього рівня в висхідному повітрі відбувається хмароутворення. Адіабатичне охолодження теплого повітря, що ковзає уздовж клину холодного, посилюється розвитком висхідних рухів від нестационарності при динамічному падінні тиску і від збіжності вітру в нижньому шарі атмосфери. Охолодження теплого повітря при висхідному ковзанні по поверхні фронту призводить до утворення характерної системи слойстообразних хмар (хмар висхідного ковзання): перисто-шаруваті – високо-шаруваті – шарувато-дощові (Cs-As-Ns) [117].

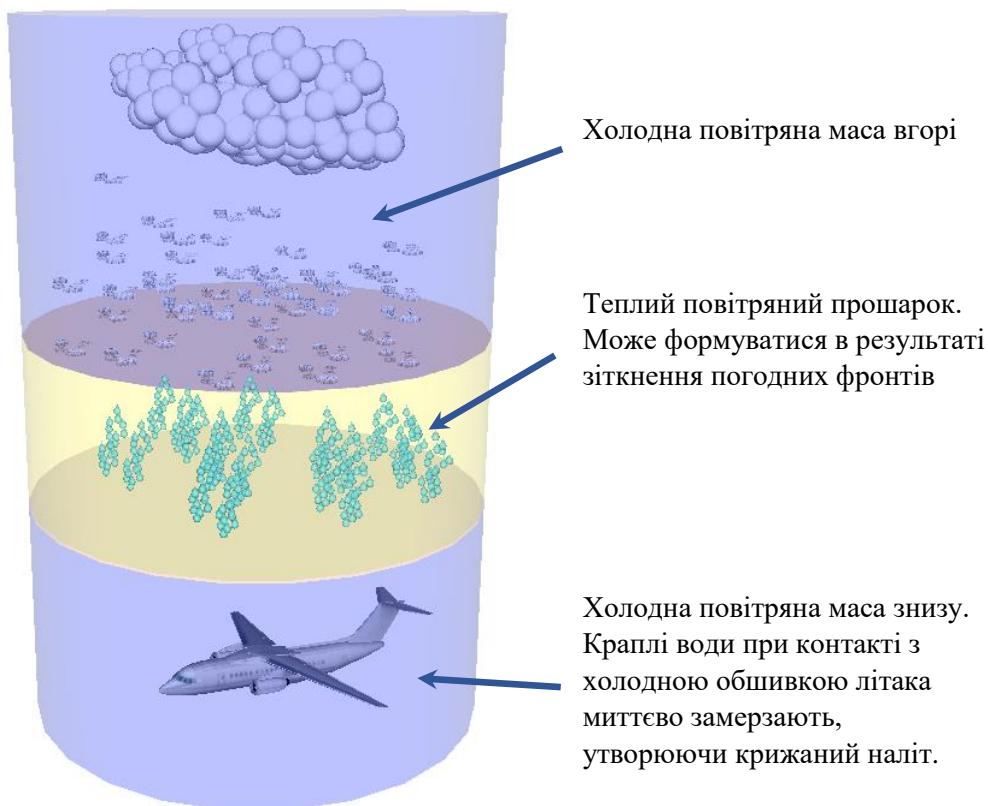


Рис. Д.2-2. Сценарій переохолодженого дощу

Опади, що випадають у вигляді снігу з хмар верхнього ярусу, проходять під час свого руху вниз шар теплого повітря. При певному поєднанні товщини теплого шару і його температури, сніжинки і крижані кристали можуть встигнути розтанути, перетворюючись в краплі дощу. Опускаючись ще нижче, краплі потрапляють в зону

негативних температур. Якщо розмір крапель достатньо великий або товщина нижнього шару невелика, краплі не встигають замерзнути в процесі падіння і замерзають вже після падіння на землю, утворюючи сильне обледеніння різних наземних об'єктів і поверхні землі (рис. Д.2-2). Отже, для алгоритму виявлення ЗНО під час польоту індикаторами небезпеки можуть бути одночасна присутність в верхньому шарі хмари кристалів льоду, в середньому шарі - крапель води і температурна інверсія в нижньому шарі. Температурна інверсія можемо бути визначена безпосередньо вимірюванням температури забортного повітря, якщо ПС знижується (заходить на посадку) або не радіолокаційними засобами. Якщо маршрут польоту ПС проходить під таким хмарою, ПС може наражатися на небезпеку обледеніння.

2.3. Сценарій шаруватого обледеніння

Шарувате (*stratiform*) обледеніння – метеорологічне явище, при якому також спостерігається випадання рідких опадів при мінусовій температурі повітря, що приводить до утворення крижаної кірки на поверхні ПС. Але механізм утворення рідких крапель тут принципово інший, ніж в разі переохолодженого дощу [2, 102]. Якщо алгоритм ADWICE виявляє значення температури і вологості, що знаходяться між деякими встановленими порогами, вважається, що знайдена зона шаруватого обледеніння. Якщо є шар вологого повітря з відносною вологістю більше 85% в діапазоні температур 0...-12 °C, зверху якого розташований шар щодо сухого повітря, дрібні переохолоджені краплі води, мряка (*Freezing drizzle*) утворюються в результаті класичних процесів випаровування і конденсації [102]. Це так званий процес теплого дощу (*Warm-rain" process*). Механізм утворення переохолодженого теплого дощу (*Supercooled warm-rain process – SWRP*) [102] пояснює, яким чином рідкі краплі можуть формуватися і залишатися в рідкій фазі при температурах нижче точки замерзання. Відомо, що у теплій хмарі (з позитивною температурою), гідрометеори починають утворюватися і зростати за допомогою конденсації пари, при зіткненні і з'єднанні крапельок. Залежно від атмосферних умов, холодна хмара (частково або повністю охолоджена до негативних температур) може містити крижані кристали,

переохоложені рідкі водні крапельки, або обидва типи гідрометеорів. Кристали льоду мають тенденцію очищати хмару від переохоложених водяних крапель, оскільки вони діють як ядра або зародки кристалізації при зіткненнях гідрометеорів.

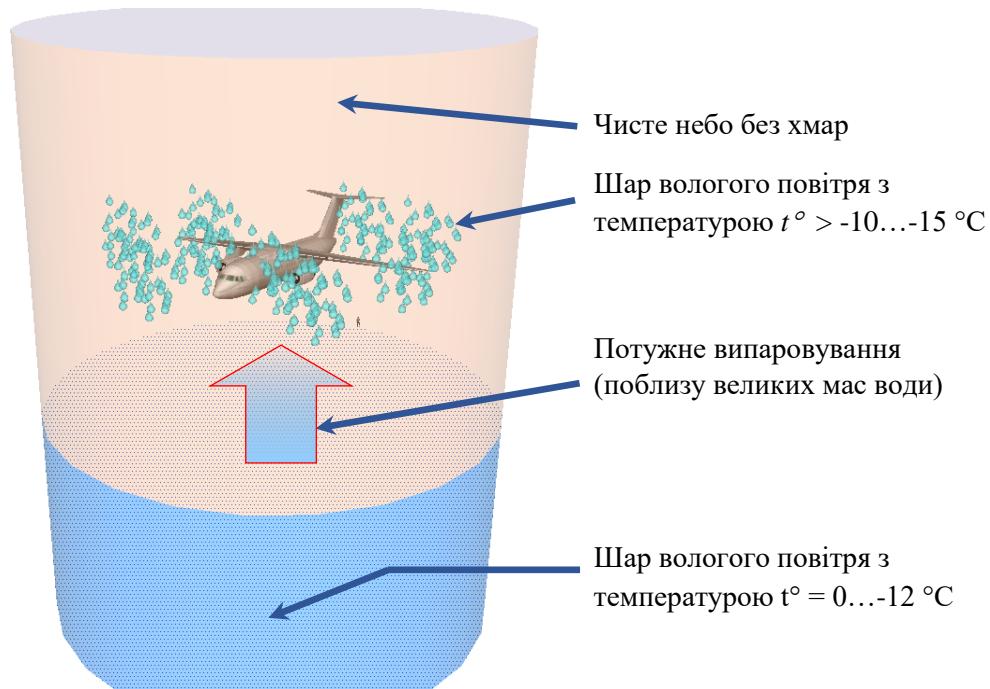


Рис. Д.2-3. Сценарій шаруватого обледеніння

Таким чином, для того, щоб мати високу концентрацію переохоложених водних крапель, хмара має мати мінімальний вміст крижаних кристалів, або взагалі не мати їх [102]. Є два основних параметри, які визначають, чи буде хмара мати переохоложені водні краплі або крижані кристали: розмір краплі і температура хмари [46]. По-перше, дощ не буде формуватися, якщо розмір крапель менше 30 мікрометрів. Великі краплі, близько 200 мікрометрів, можуть замерзти при температурі близько -5°C , але для більш дрібних, від 40 до 100 мікрометрів, процес кристалізації починається в діапазоні температур $-10...-15^{\circ}\text{C}$ [46]. Таким чином, хмара, що має температуру $0...-10^{\circ}\text{C}$, навряд чи утворює крижані кристали, якщо вони не були присутні заздалегідь, і якщо немає великих крапель. При температурі -15°C починають формуватися дендритні форми крижаних кристалів, і їх кількість швидко зростає, оскільки вони починають падати вниз як сніг, по дорозі стикаючись з переохоложеними краплями і ініціюючи їх кристалізацію. Для того, щоб мала місце

зона шаруватого обледеніння (рис. Д.2-3), атмосфера вище переохолодженого хмари повинна бути сухою, оскільки будь-який сніг, падаючий від розташованих вище шарів хмарності, швидко очистив би переохолоджені рідкі водні крапельки знизу. А температура верхнього шару хмари не повинна перевищувати -10°C , оскільки при більш низькій температурі кристали почнуть утворюватися в самій хмарі. Кількість дрібних водних крапель швидше зростає в досить чистому повітрі, що містить невелику кількість ядер конденсації. Зазвичай, морське повітря містить близько 100 ядер конденсації (в основному, частинок морської солі) на 1 см^3 . Континентальне повітря містить близько 400 ядер конденсації на 1 см^3 . Це, в основному, частинки пилу [102]. У статті [102], яка описує випадання переохолодженого теплого дощу в місті Джуно, Аляска 18–20 січня 2000 року, і його причини, йдеться про те, що це цікаве метеорологічне явище тривало понад 52 годин і стало серйозною перешкодою для місцевого аеропорту.

2.4. Сценарій конвективного обледеніння

Конвективне (*convective*) обледеніння [102] – може бути виявлено шляхом оцінки стабільності повітряних мас атмосфери.

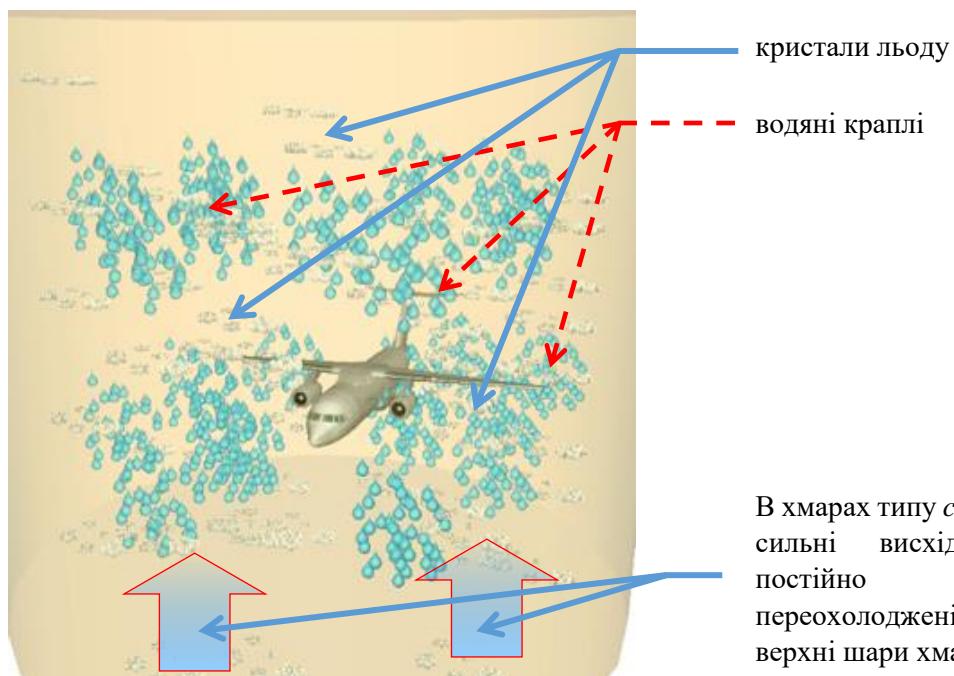


Рис. Д.2-4. Сценарій конвективного обледеніння.

Імовірність конвективного обледеніння присутня у всіх конвективних хмара, що мають вертикальну протяжність хоча б 3000 м і температуру повітря нижче 0 °C [2, 102]. Цей механізм обумовлений вертикальним переміщенням повітряних шарів всередині хмари, рис. Д.2-4. Внаслідок цього, транспортування вологи з нижніх шарів у верхні створює безліч переохолоджених крапель. А швидкість замерзання крапель в такому хмарі недостатньо велика для того, щоб відразу перетворити краплі в кристали [102].

2.5. Сценарій загального обледеніння [102]

Загальний (general) сценарій обледеніння. Навіть якщо жоден з вищезазначених режимів обледеніння не діагностовано, все ще є шанс для виникнення умов небезпечної обледеніння щоразу, коли температура і вологість лежать в межах певного діапазону. У цьому випадку алгоритм прогнозує ЗНО згідно загального сценарію.

Використовуючи дані розгалуженої мережі наземних радіолокаційних станцій, дані метеорологічних супутників і суперком'ютерний обчислювальний центр, на основі декількох кліматологічних моделей двічі на добу будується прогноз у вигляді погодних карт, із зазначенням несприятливих зон ймовірного зледеніння повітряних суден. Підсумковий прогноз має вигляд погодних карт з позначеннями на них зонами ймовірного обледеніння повітряних суден (рис. Д.2-5).

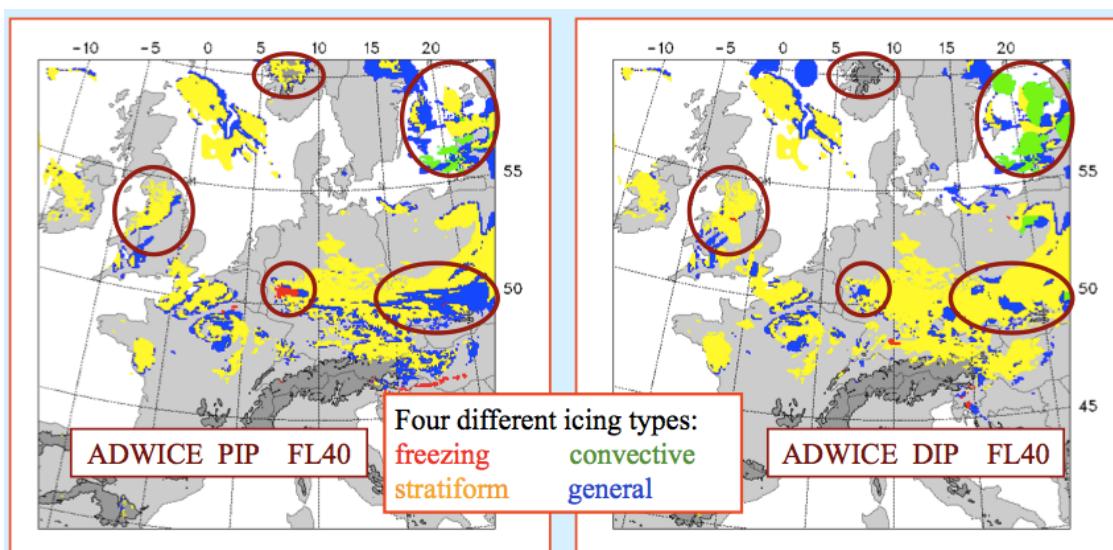


Рис. Д.2-5. Карта прогнозу ймовірного зледеніння станом на 19.11.2001. Кольором виділені різні типи зон ймовірного обледеніння [102]

ДОДАТОК З

Оцінка температури метеорологічного об'єкту за допомогою температурного градієнта повітря

Наведемо деякі теоретичні відомості з розділу 3 книги А.М. Яковлєва «Авіаційна метеорологія» [47]:

Температура може змінюватися як по горизонталі (уздовж земної поверхні), так і по вертикалі (з підйомом вгору). У першому випадку величину зміни температури характеризує горизонтальний, у другому вертикальний градієнти температури. Величина горизонтального градієнта температури виражається в градусах на певну відстань (найчастіше це відстань становить 100 км). У однорідної повітряної маси, що займає великі площини, величина горизонтального градієнта температури становить десяті частки градуса на 100 км. При переході з однієї повітряної маси в іншу (наприклад, з холодної в теплу) він може перевищувати 10°C на 100 км. Оскільки в атмосферу тепло надходить головним чином від земної поверхні, то в тропосфері температура з висотою зазвичай знижується. Величина, що характеризує вертикальні зміни температури повітря, називається вертикальним температурним градієнтом. Він позначається грецькою буквою γ і зазвичай розраховується в градусах $^{\circ}\text{C}$ на 100 м висоти. Величина вертикального температурного градієнта не постійна і залежить від характеру повітряної маси, часу доби, року і інших причин. При звичайному зниженні температури з висотою вертикальний температурний градієнт вважається позитивною величиною, тобто $\gamma > 0$. При зростанні температури з висотою, градієнт є негативною величиною, тобто $\gamma < 0$, а шар повітря, де це спостерігається, називається *інверсією*.

При незмінній температурі з висотою вертикальний градієнт температур дорівнює нулю, тобто $\gamma = 0$, а шар носить назву *ізотермії*.

У стандартній атмосфері вертикальний температурний градієнт прийнятий рівним $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. Вертикальний температурний градієнт характеризує температурну будову атмосфери або її термічну стратифікацію ...

Наочне уявлення про розподіл температури по висотах дає графік

температурної стратифікації. На цьому графіку по горизонтальній осі відкладається температура (від меншого значення до більшого - зліва направо), по вертикальній осі – висота, або тиск повітря, що відповідає даній висоті.

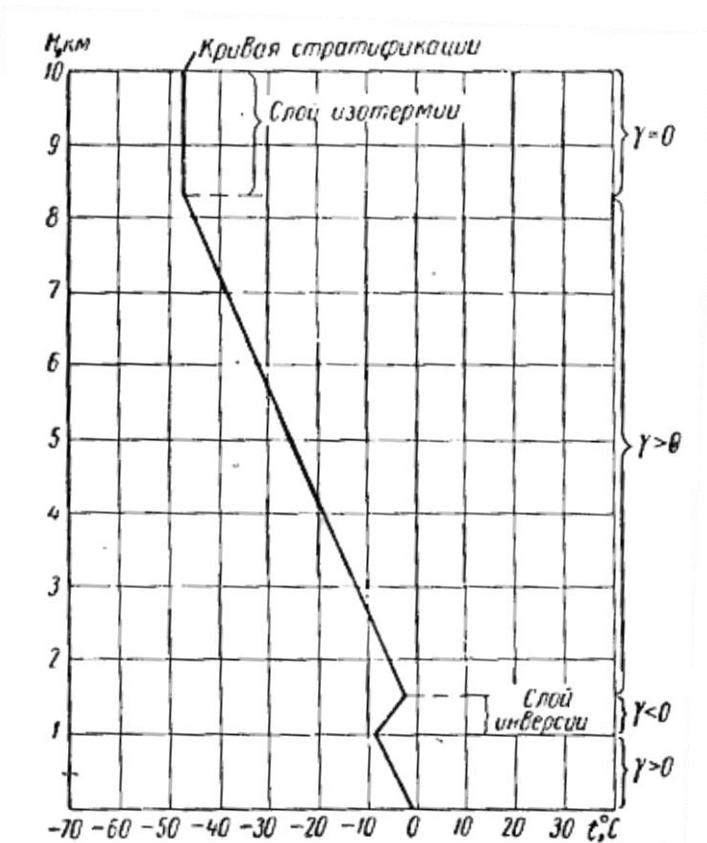


Рис. Д.3-1. Графік розподілу температури по висотах (крива стратифікації)

Нанесені на цей графік точки температури, що спостерігається по висотах (за даними радіозонда або літака) з'єднуються між собою, в результаті чого виходить крива, що називається кривою стратифікації (рис. Д.3-1). Нахил кривої вліво відповідає нормальному падінню температури з висотою ($\gamma > 0$); нахил кривої вправо відповідає інверсії ($\gamma < 0$); якщо крива йде вертикально вгору ($\gamma = 0$), спостерігається шар ізотермії... [47]

Необхідно відзначити, що спосіб визначення температури метеорологічного об'єкта, запропонований в заявлі [70] можна вважати застарілим. Справа у тому, що визначення температури досліджуваного метеорологічного об'єкта на підставі висотного градієнта температур може давати досить велику похибку. Ця похибка

може бути обумовлена, наприклад, наявністю температурної інверсії. Наведемо витяг з книги Яковлєва про температурні інверсії [39]:

Інверсії температури

Велике значення для розвитку атмосферних процесів грають інверсії температури. Вони є шарами, що затримують рух. Інверсії гасять вертикальні рухи повітря; під ними відбувається скучення водяної пари або інших твердих частинок, що погіршують видимість, утворюються тумани і різні форми хмар. Шари інверсій є шарами, що гальмують рух і для горизонтальних рухів повітря. У багатьох випадках ці шари є поверхнями розриву вітру (над і під інверсією має місце різка зміна швидкості і напряму вітру).

Інверсії в тропосфері можуть спостерігатися у землі і на різних висотах в усі сезони року. Потужним шаром інверсії найчастіше є тропопауза.

Залежно від причин виникнення розрізняють наступні типи інверсій: *радіаційні, адвективні, стиснення або осідання, фронтальні*.

Радіаційні інверсії виникають поблизу земної поверхні внаслідок випромінювання (радіації) нею великої кількості тепла. Цей процес найсильніше відбувається при ясному небі в тепле півріччя вночі, а в холодну – протягом усієї доби. Радіаційна інверсія починається від самої поверхні землі. У тепле півріччя їх вертикальна потужність не перевищує декількох десятків метрів. Зі сходом сонця такі інверсії зазвичай руйнуються. У зимовий час радіаційні інверсії можуть сягати вгору на кілька сотень метрів (іноді до 1...1,5 км) і утримуватися протягом декількох діб і навіть тижнів.

Адвективні інверсії утворюються при переміщенні (адвекції) теплого повітря по холодній підстильної поверхні. Нижні шари повітря охолоджуються внаслідок зіткнення із холодною поверхнею. Це охолодження шляхом турбулентного перемішування передається в більш високі шари. У шарі різкого зменшення турбулентності спостерігається деяке зростання температури (інверсія). Вище охолодженого шару течуть теплі повітряні маси, в яких спостерігається звичайне падіння температури з висотою.

Адвективні інверсії виникають на висоті кількох сотень метрів від земної

поверхні. Їх вертикальна потужність становить кілька десятків метрів. У помірних широтах цей тип інверсії спостерігається головним чином в холодну половину року.

Інверсії стиснення або осідання утворюються в області підвищеного тиску (антициклоні) в результаті опускання верхніх шарів повітря і адіабатичного нагрівання цього шару на 1°C на кожні 100 м. Нагріте повітря, що опускається, не поширюється до самої земної поверхні (цьому заважає уповільнений рух нижніх приземних шарів повітря внаслідок тертя їх о земну поверхню), а розтікається на деякій висоті (рис. Д.3-2), утворюючи шар з підвищеною температурою (інверсією). Інверсії стиснення мають велику горизонтальну протяжність. Їх вертикальна потужність становить кілька сотень метрів. Найчастіше ці інверсії утворюються на висоті 1...3 км.

Фронтальні інверсії пов'язані з фронтальними розділами, які є перехідними шарами між холодними і теплими масами повітря. На цих розділах холодне повітря завжди розташовується внизу у вигляді гострого кліпу, а тепле повітря - вище холодного. Перехідний шар між цими повітряними масами, званий фронтальною зоною або поверхнею, являє собою шар інверсії товщиною в кілька сотень метрів (рис. Д.3-3).

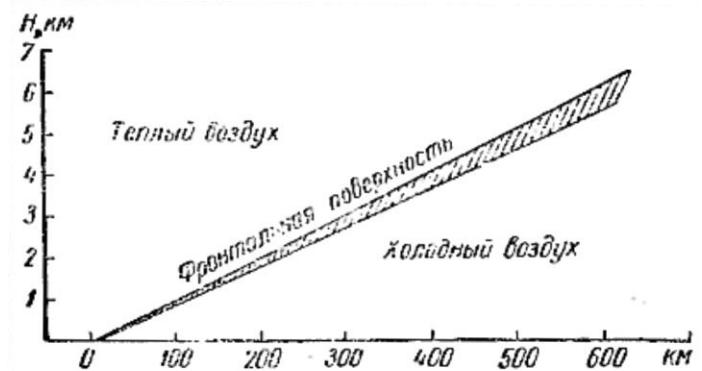
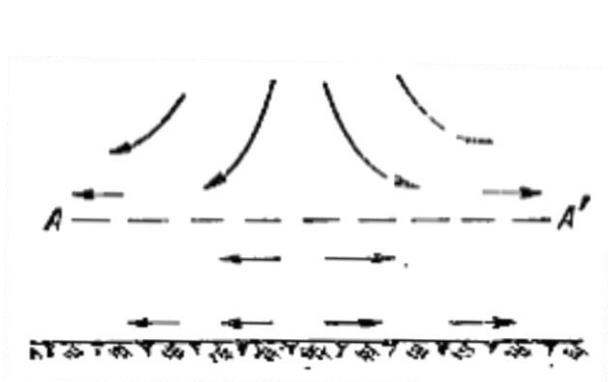


Рис. Д.3-2. Інверсія стиснення:

$A - A'$ – рівень розтікання повітря,

відповідний інверсії [47]

Рис. Д.3-3. Передня частина (передній розділ), що являє собою шар інверсії [47]



АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
Пітерцева Олександра Андрійовича

Комісія у складі:

Голови – головного наукового співробітника НДЧ ХНУРЕ д.т.н., професора Леховицького Давіда Ісааковича,

та членів комісії:

проводного наукового співробітника НДЧ ХНУРЕ, к.т.н., доцента Рябухи Вячеслава Петровича,

проводного наукового співробітника НДЧ ХНУРЕ, к.т.н., с.н.с. Зарицького Валерія Івановича,

склала цей Акт про наступне.

Результати дисертаційної роботи Пітерцева Олександра Андрійовича «Радіолокаційний метод виявлення зон можливого обледеніння літальних апаратів», зокрема матеріали його дослідень, що викладені у звіті з НДР № 685-ДБ 10 «Теоретико-експериментальне обґрунтування шляхів розширення функціональних можливостей метеорологічного радіолокатора та підвищення ефективності виявлення небезпечних метеорологічних явищ за рахунок використання поляризаційних властивостей зондувальних і відбитих сигналів» впроваджені у комплексному проекті «Розроблення першого вітчизняного наземного когерентного метеорологічного радіолокатора», код фундаментальної НДР 2201020, початок 01 липня 2010 р., закінчення 30 червня 2013 р.

№	Назва впровадженого результату	Назва документу	Досягнутий ефект
1	Евристичний (логічний) алгоритм виявлення зон можливого обледеніння літальних апаратів	Звіт № держ. реєстрації 0110U007697, 2012, розд.3.1.7, с. 151-156.	Підвищення безпеки і регулярності польотів
2	Методика вибору порогових рівнів щодо виявлення зон обледеніння	Звіт № держ. реєстрації 0110U007697, 2012, розд.3.1.7, с. 156-158.	Підвищення достовірності виявлення зон обледеніння
3	Статистичний алгоритм виявлення зон можливого обледеніння літальних апаратів	Звіт № держ. реєстрації 0110U007697, 2012, розд.3.1.7, с. 159.	Підвищення безпеки і регулярності польотів

4	Алгоритми класифікації типу гідрометеорів на засадах нечіткої логіки і нейронних мереж	Звіт № держ. реєстрації 0110U007697, 2012, розд.3.1.7, с. 160-163.	Підвищення швидкодії та безпеки польотів і їх регулярності
---	--	--	--

Головний науковий співробітник
НДЧ ХНУРЕ, д.т.н., професор

Д.І. Леховицький

Провідний науковий співробітник
НДЧ ХНУРЕ, к.т.н., доцент

В.П. Рябуха

Провідний науковий співробітник
НДЧ ХНУРЕ, к.т.н., с.н.с.

В.І. Зарицький

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор НАУ з
навчально-виховної роботи

«19» 01 2017 р.



АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
Пітерцева Олександра Андрійовича
в навчальний процес НАУ

Ми, що підписалися нижче, директор Навчально-наукового інституту аeronавігації Мачалін І.О. і завідувач кафедри електроніки Яновський Ф.Й. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Пітерцева Олександра Андрійовича «Радіолокаційний метод виявлення зон можливого обледеніння літальних апаратів» використовуються в навчальному процесі Навчально-наукового інституту аeronавігації на кафедрі електроніки.

№	Що впроваджено	Форма впровадження	Ефект від впровадження
1	Метод радіолокаційного виявлення зон можливого обледеніння літальних апаратів	Підручник «Радіолокаційні системи повітряних суден», Київ, НАУ, 2012, підрозділ 3.8.6. Локалізація зони небезпечної обледеніння поляриметричними радіолокаційними системами, стор. 262-263.	Підвищення якості навчального процесу з радіоелектронних систем
2	Моделі розсіяння поляриметричних сигналів на краплях дощу і льодяних кристалах	Продовження розробки в магістерській дипломній роботі Кордиш К.М. «Моделі радіолокаційних сигналів допплерівської поляриметричної системи виявлення небезпечних зон в атмосфері» (англ. мовою), лютий, 2015, стор. 97-102.	Підвищення якості підготовки магістрів
3	Моделі розсіяння сигналів радіолокаторів з подвійною поляризацією на гідрометеорах різного типу	Постановка нової лабораторної роботи «Розсіяння поляризованих радіохвиль на об'єктах складної форми» з дисципліни «Радіоелектронні системи» з виконанням розрахунків і моделюванням в середовищі Matlab, Київ, 2017	Підвищення якості підготовки магістрів за спеціальностями 8.050802.02 та 8.171 «Електронні системи»

Директор НН ІАН

Завідувач кафедри електроніки

I. Мачалін

Ф. Яновський

ДОДАТОК 5.1

**Розрахунок значень поляриметричних змінних в MATLAB:
кристали льоду стовпчастого типу, що розподілені в просторі хаотично**

[Зміст](#)

Встановлюємо початкові значення основних параметрів	198
Задаємо розподіл точок на поверхні одиничної сфери	198
Перетворюємо систему координат	200
Малюємо сукупність кристалів із заданим розподілом у просторі	200
Обчислюємо значення поляриметричних параметрів	201
Будуємо графіки функцій	201
Малюємо зовнішній вигляд еліпсоїда, що підміняє форму кристала льоду	202
Додаткові функції, що викликаються:	203

[Встановлюємо початкові значення основних параметрів](#)

```

clear;
clc;
global wavelength;
global eps_r;
wavelength=32; % задаємо довжину хвилі в мм
eps_r=3; % Задаємо значення діелектричної проникності

ZDR_crystals(10,1)=zeros; % Масив нулів для подальшого розрахунку ДВ
LDR_crystals(10,1)=zeros; % Масив нулів для подальшого розрахунку ЛДВ
Rho_crystals(10,1)=zeros; % Масив нулів для подальшого розрахунку КК

n=200000; % Загальне кількість точок
k_min=n; % Мінімальна кількість точок
s=0; % Змінна-перемикач, використовується для відтворення розподілу
      % точок на поверхні одиничної сфери тільки 1 раз

Phh_crystals(10,n)=zeros; % Масив нулів для подальшого розрахунку
                           % коефіцієнтів форми
Phv_crystals(10,n)=zeros;
Pvv_crystals(10,n)=zeros;

j=1; % Ця змінна використовується для індексації значень масивів
      % при зберіганні розрахунків для різних кутів місця

for teta_deg=0:20:180 % Перебираємо кути місця нахилу антени радіолокатора

```

[Задаємо розподіл точок на поверхні одиничної сфери](#)

```

for L=0.1:0.1:8 % задаємо розмір кристалів льоду

```

```

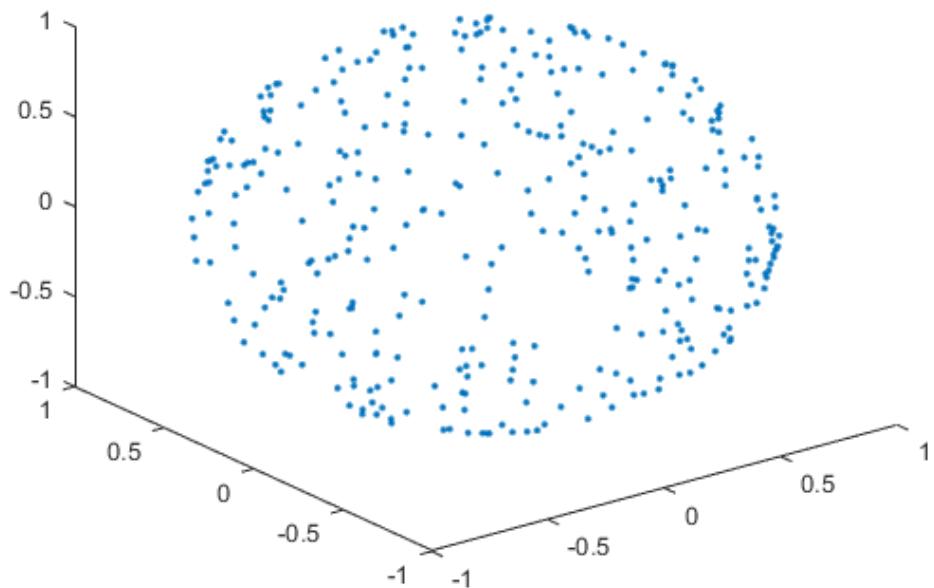
r=1; % Радіус кулі з центром в (0,0,0)
X=zeros(1,n);% Масиви зберігання координат точок
Y=zeros(1,n);
Z=zeros(1,n);

k=0; % лічильник точок, що потрапили всередину кулі
Er=0.01; % похибка
for i=1:n
    x=randn/pi; % Нова можлива координата по осі X
    y=randn/pi; % Нова можлива координата по осі Y
    z=randn/pi; % Нова можлива координата по осі Z
    % Таким чином задається рівномірний розподіл
    % z=(1-2*rand);
    ro2=x^2+y^2+z^2; % Квадрат відстані від точки до центру
    if abs(ro2-r^2)<=Er % Обмеження по радіусу
        k=k+1;% Дана точка потрапила в коло
        X(k)=x;
        Y(k)=y;
        Z(k)=z;
    end
end

if k<k_min
    k_min=k;
end

X=X(1:k_min); % Видаляємо непотрібні нулі
Y=Y(1:k_min);
Z=Z(1:k_min);
if s==0 % Перевірка, чи був даний графік вже намальований
    plot3(X,Y,Z, '.')
    % В результаті отримаємо зображення розподілу точок по
    % поверхні одиничної сфери. Тут видно, що розподіл - рівномірний
end

```



Перетворюємо систему координат

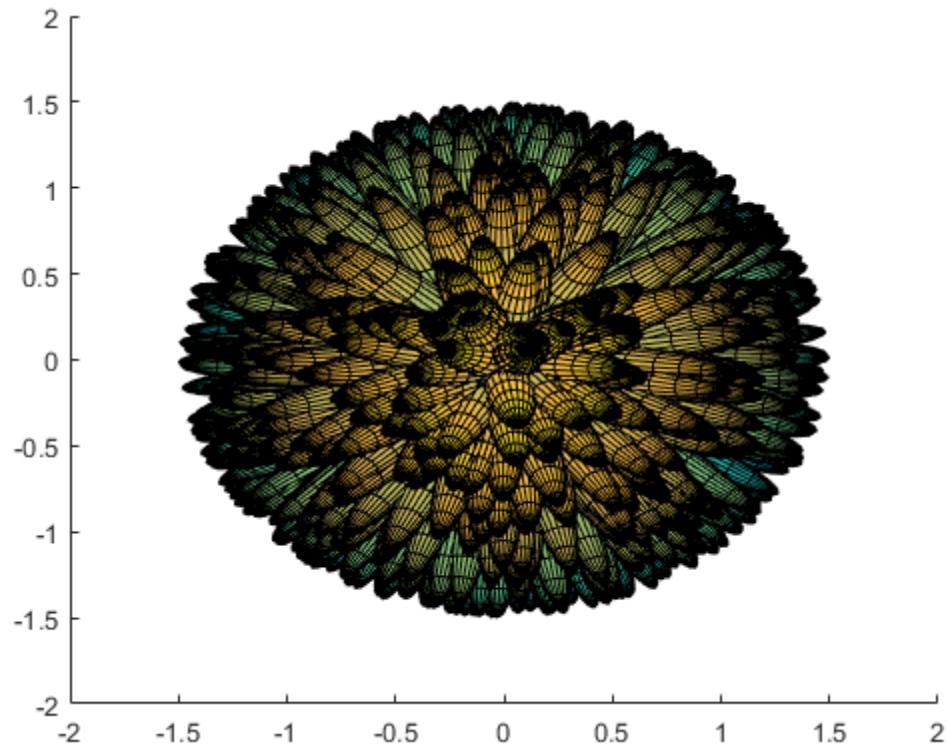
```
[alphaU deltaU R]=cart2sph(X,Y,Z); % Переходимо від декартової системи
% координат до сферичної

alpha=pi/2+alphaU;
delta=3*pi/2-deltaU;
% Перетворюємо кути alpha і delta відповідно до тих,
% що використовуються у формулах 2.51-2.53 глави 2 дисертації

phi=0; % Задаємо кут повороту горизонтальної площини поляризації
teta=teta_deg*pi/180; % Переводимо з градусів в радіани
```

Малюємо сукупність кристалів із заданим розподілом в просторі

```
if s==0 % Перевірка, чи був даний графік вже намальований
    figure;
    hold on
    for i=1:length(alpha)
        illustrate(alpha(i),delta(i),0,0,3);
        % Ця функція малює еліпсоїд із заданими співвідношенням сторін
        % і положенням у просторі
    end
    axis([-2 2 -2 2 -2 2]);
end
s=1;
% На цьому графіку також видно, що розподіл - рівномірний
```



Обчислюємо значення поляриметричних параметрів

```

for i=1:k_min
    [hh vv hv]=q(alpha(i),delta(i),phi,teta,L);
    Phh_crystals(j,i)=Phh_crystals(j,i)+hh*N_fun(L)*fun_sigma(L);
    Pvv_crystals(j,i)=Pvv_crystals(j,i)+vv*N_fun(L)*fun_sigma(L);
    Phv_crystals(j,i)=Phv_crystals(j,i)+hv*N_fun(L)*fun_sigma(L);
    %
    Phh_crystals(j,i)=Phh_crystals(j,i)+hh*N_fun(fun_d(L))*fun_sigma(fun_d(L));
    %
    Pvv_crystals(j,i)=Pvv_crystals(j,i)+vv*N_fun(fun_d(L))*fun_sigma(fun_d(L));
    %
    Phv_crystals(j,i)=Phv_crystals(j,i)+hv*N_fun(fun_d(L))*fun_sigma(fun_d(L));
    % Закоментовані три верхні строки використовуються для
    % моделювання відбиття від пластинчастих кристалів

end

end
ZDR_crystals(j,1)=10*log10(sum(Phh_crystals(j,1:k_min))/sum(Pvv_crystals(j,1:k_min)));
% Обчислюємо значення ДВ для сукупності частинок

LDR_crystals(j,1)=10*log10(sum(Phv_crystals(j,1:k_min))/sum(Pvv_crystals(j,1:k_min)));
% Обчислюємо значення ЛДВ для сукупності частинок

Rho=corrcoef(Phh_crystals(j,:),Pvv_crystals(j,:));
Rho_crystals(j)=Rho(1,2);
% Вираховуємо значення КК для сукупності частинок

j=j+1;

```

```

end
% Переходимо до розрахунків для наступного кута місця

```

Будуємо графіки функцій

```

angles=0:20:180;

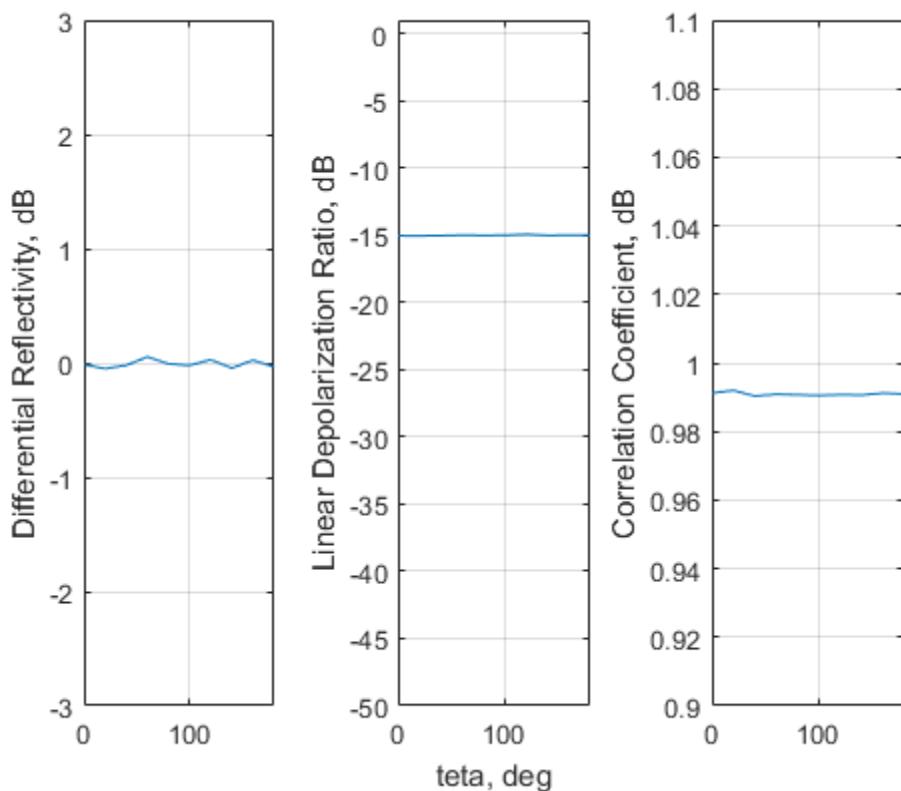
figure; % Створюємо нове вікно

subplot(1,3,1), plot(angles,ZDR_crystals),
ylabel('Differential Reflectivity, dB');
% Будуємо графік залежності ДВ від кута сканування антени радіолокатора
grid on;
axis([0 180 -3 3])

subplot(1,3,2), plot(angles,LDR_crystals),
xlabel ('teta, deg'), ylabel('Linear Depolarization Ratio, dB');
% Будуємо графік залежності ЛДВ від кута сканування антени радіолокатора
grid on;
axis([0 180 -50 1]);

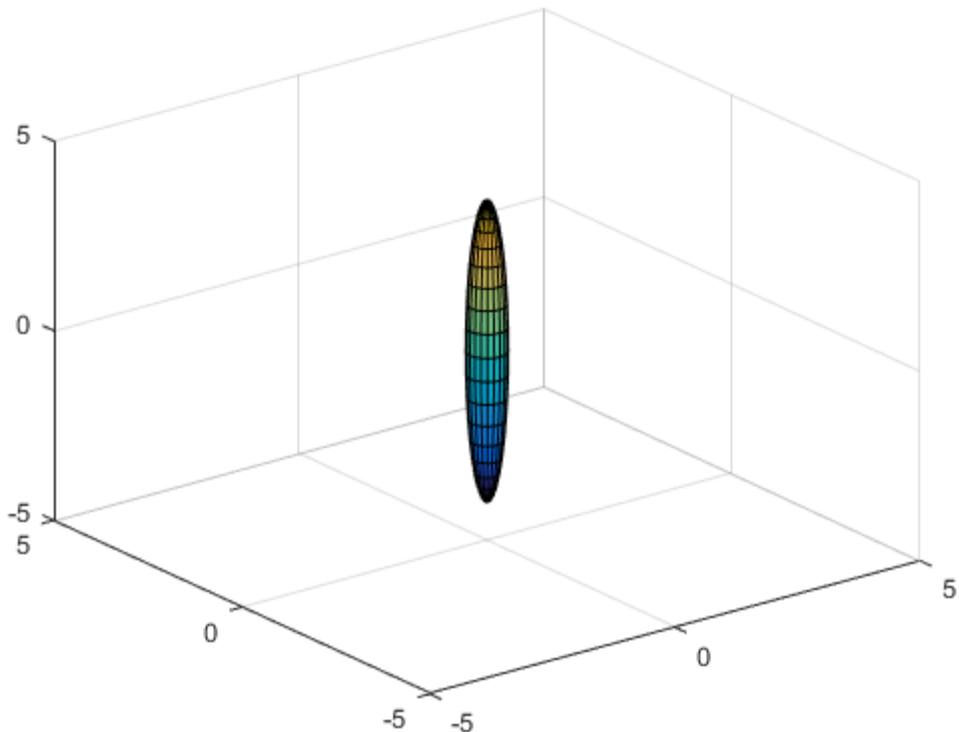
subplot(1,3,3), plot(angles,Rho_crystals);
ylabel('Correlation Coefficient, dB');
% Будуємо графік залежності КК від кута сканування антени радіолокатора
grid on;
axis([0 180 0.9 1.1]);

```



Малюємо зовнішній вигляд еліпсоїда, що підміняє форму кристала льоду

```
figure;
a1=fun_a1(L);
a3=fun_a3(L);
[x,y,z] = ellipsoid(0,0,0,a1,a1,a3,20);
h=surf(x,y,z);
axis([-5 5 -5 5 -5 5]);
```



Додаткові функції, що викликаються:

```
function z = A1 (L)
% Ця функція обчислює електромагнітні коефіцієнти форми еліпсоїда
```

```
global eps_r; z = 1 ./ (1 + lambda1 (L) . * (eps_r-1));
end
```

```
function z = A3 (L)
% Ця функція обчислює електромагнітні коефіцієнти форми еліпсоїда
```

```
global eps_r; z = 1 ./ (1 + lambda3 (L) . * (eps_r-1));
end
```

```
function z = beta (L)
% Ця функція визначає ступінь "сплюснутості" еліпсоїда
```

```
z = fun_a1 (L) ./ fun_a3 (L);
end
```

```
function z = fun_a1 (L)
% Ця функція обчислює довжини двох другорядних піввісів сфeroїда
```

```
z = fun_d (L) / 2;
end
```

```
function z = fun_a3 (L)
% Ця функція обчислює довжину головної півосі сфeroїда
```

```
z = L. / 2;
end
```

```
function z = fun_d (L)
% Ця функція визначає залежність діаметра частинки від довжини
```

```
% Для голчастих кристалів
% Z = 0.006 * L. ^ 0.52;
```

```
% Для стовпчастих кристалів
z = 0.1 * L. ^ 0.93;
```

```
% Для пластинчастих кристалів
% Z = (100 * L). ^ (1 / 0.42);
```

```
% Для рідких крапель
% Z = L ./ (0.5 * (exp (- (L. ^ 2) / 27)) + 0.5);
end
```

```
function sigma = fun_sigma (L)
% Ця функція розраховує ЕПР еліпсоїда згідно з формулою Релея
```

```
global wavelength;
global eps_r; sigma = (pi ^ 5 * L ^ 6) / wavelength.^4 * (((eps_r-1) / (eps_r + 2)) ^ 2);
```

```
end
```

```
function z = illustrate (alpha, delta, phi, teta, L)
% Ця функція малює еліпсоїд із заданими спiввiдношеннями сторiн
% i положенням в просторi
```

```
a1 = fun_a1 (L); a3 = fun_a3 (L); [x, y, z] = ellipsoid (0,0,0, a1, a1, a3,20); h = surf
(x, y, z);
```

```
% Axis ([- 1 1 -1 1 -LL]);
center = [0 0 0]; dir1 = [1 0 0]; rotate (h, dir1, radtodeg (delta), center); dir2 = [0 0
1]; rotate (h, dir2, radtodeg (alpha), center ); z = [phi_hh (alpha, delta, phi, teta)
phi_vv (alpha, delta, phi, teta)];
```

```
function z = lambda1 (L)
% Ця функція розраховує коефіцієнт "лямбда", який визначається формою
% частки
```

```
z = (1-lambda3 (L)) ./ 2;
```

```
function z = lambda3 (L)
% Ця функція перевіряє, чи є сфериод витягнутим або сплюсненим
```

```
if beta (L) <1 && beta (L)> 0 z = ((1-E (L). ^ 2) ./ (E (L). ^ 2)). * (- 1 + (1 /
...
(2. * E (L))). * Log ((1 + E (L)) ./ (1-E (L))));
```

```
else
    z = ((1 + f (L). ^ 2) / f (L). ^ 2). * ...
    (1- (1./f (L)). * Atan (f (L)));
end
```

```
function z = E (L) z = sqrt (1-beta (L). ^ 2);
```

```
function z = f (L) z = sqrt (beta (L). ^ 2-1);
```

```
function Z = N_fun (L)
% Ця функція визначає формулу розподілу часток за розмірами
```

```
Z = 1000. * L. ^ - 2.3;
end
```

```
function z = phi_hh (alpha, delta, phi, teta)
% Ця функція задає формулу 2.51 глави 2 дисертації
```

```
z = (sin (delta). ^ 2). * (cos (alpha). ^ 2). * (sin (phi). ^ 2). * (sin (teta). ^ 2) + ...
(sin (delta). ^ 2). * (sin (alpha). ^ 2). * (cos (phi). ^ 2) + (cos (delta). ^ 2). * ...
(sin (phi). ^ 2). * (Cos (teta). ^ 2) -0.5. * sin (2. * delta). * cos (alpha). * ...
(sin (phi). ^ 2). * Sin (2. * teta) -0.5. * sin (2. * delta). * sin (alpha). * ...
sin (2. * phi). * cos (teta) +0.5. * (sin (delta). ^ 2). * sin (2. * alpha). * ...
sin (2. * phi). * sin (teta);
end
```

```
function z = phi_vv (alpha, delta, phi, teta)
% Ця функція задає формулу 2.52 глави 2 дисертації
```

```
z = (sin (delta). ^ 2). * (cos (alpha). ^ 2). * (cos (phi). ^ 2). * (sin (teta). ^ 2) + ...
(sin (delta). ^ 2). * (sin (alpha). ^ 2). * (sin (phi). ^ 2) + (cos (delta). ^ 2). * ...
(Cos (phi). ^ 2). * (Cos (teta). ^ 2) -0.5. * sin (2. * delta). * Cos (alpha). * ...
(Cos (phi). ^ 2). * Sin (2. * teta) + 0.5. * sin (2. * delta). * sin (alpha). * ...
sin (2. * phi). * cos (teta) -0.5. * (sin (delta). ^ 2). * sin (2. * alpha). *
```

```

sin (2. * phi). * sin (teta);
end

```

```

function z = phi_hv (alpha, delta, phi, teta)
% Ця функція задає формулу 2.53 глави 2 дисертації

z = (0.5. * sin (2. * phi). * ((sin (delta). ^ 2). * (sin (alpha). ^ 2) - (sin (delta). ^ 2). * ...
(cos (alpha). ^ 2). * (sin (teta). ^ 2) - (cos (delta). ^ 2) - sin (2. * delta). * ...
cos (alpha). * sin (2. * teta)) - 0.5. * cos (2. * phi). * ((sin (2. * alpha). * ...
(sin (delta). ^ 2). * sin (teta) - sin (2. * delta). * sin (alpha). * cos (teta))));
end

```

```

function [Qhh, qvv, qhv] = q (alpha, delta, phi, teta, L)
% Ця функція обчислює відносну потужність прийнятого сигналу на різних
% поляризаціях

```

```

qhh = ((A1 (L) + (A3 (L) - A1 (L)). * phi_hh (alpha, delta, phi, teta))). ^ 2; qvv = ((A1
(L) + (A3 (L) - A1 (L)). * phi_vv (alpha, delta, phi, teta))). ^ 2; qhv = ((A3 (L) - A1
(L)). * phi_hv (alpha, delta, phi, teta)). ^ 2;
end

```

ДОДАТОК 5.2

**Розрахунок значень поляриметричних змінних в MATLAB:
рідкі краплі води, що розподілені в просторі переважно горизонтально**

Зміст

Встановлюємо початкові значення основних параметрів	207
Задаємо розподіл точок на поверхні одиничної сфери	207
Перетворюємо систему координат.....	209
Малюємо сукупність крапель із заданим розподілом у просторі.....	209
Обчислюємо значення поляриметричних параметрів	210
Будуємо графіки функцій	210
Малюємо зовнішній вигляд еліпсоїда, що підміняє форму краплі дощу	211
Додаткові функції, що викликаються:	212

Встановлюємо початкові значення основних параметрів

```

clear;
clc;
global wavelength;
global eps_r;
wavelength=32; % задаємо довжину хвилі в мм
eps_r=81; % Задаємо значення діелектриченої проникності

ZDR_drops(10,1)=zeros; % Масив нулів для подальшого розрахунку ДВ
LDR_drops(10,1)=zeros; % Масив нулів для подальшого розрахунку ЛДВ
Rho_drops(10,1)=zeros; % Масив нулів для подальшого розрахунку КК

n=20000; % Загальне кількість точок
k_min=n; % Мінімальна кількість точок
s=0; % Змінна-перемикач, використовується для відтворення розподілу
      % точок на поверхні одиничної сфери тільки 1 раз

Phh_drops(10,n)=zeros; % масив нулів для подальшого розрахунку
                        % коефіцієнтів форми
Phv_drops(10,n)=zeros;
Pvv_drops(10,n)=zeros;

j=1; % Ця змінна використовується для індексації значень масивів
      % при зберіганні розрахунків для різних кутів місця

for teta_deg=0:20:180 % Перебираємо кути місця нахилу антени радіолокатора

```

Задаємо розподіл точок на поверхні одиничної сфери

```

for L=0.1:0.1:5 % задаємо розмір крапель

```

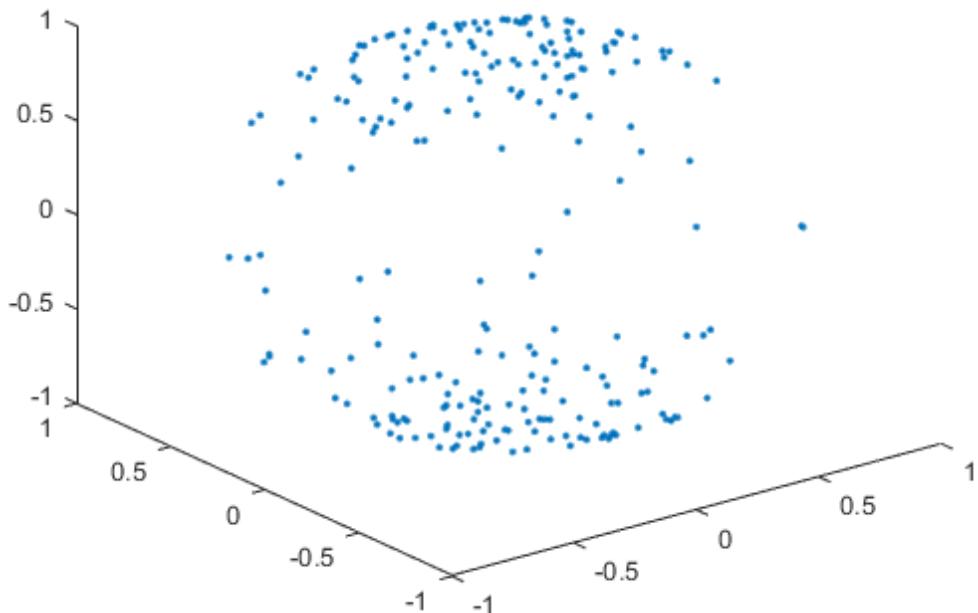
```

r=1; % Радіус кулі з центром в (0,0,0)
X=zeros(1,n);% Масиви зберігання координат точок
Y=zeros(1,n);
Z=zeros(1,n);

k=0; % лічильник точок, що потрапили всередину кулі
Er=0.01; % похибка
for i=1:n
    x=randn/pi; % Нова можлива координата по осі X
    y=randn/pi; % Нова можлива координата по осі Y
    % z=randn/pi; Нова можлива координата по осі Z
    z=(1-2*rand); % новая возможная координата по оси Y
    % Таким чином задається переважно горизонтальний розподіл
    % крапель у просторі

    ro2=x^2+y^2+z^2; % Квадрат відстані від точки до центру
    if abs(ro2-r^2)<=Er % обмеження по радіусу
        k=k+1; % дана точка потрапила в коло
        X(k)=x;
        Y(k)=y;
        Z(k)=z;
    end
end
if k<k_min
    k_min=k;
end
X=X(1:k_min); % Видаляємо непотрібні нулі
Y=Y(1:k_min);
Z=Z(1:k_min);
if s==0 % Перевірка, чи був даний графік вже намальований
    plot3(X,Y,Z, '.')
    % В результаті отримаємо зображення розподілу точок по
    % поверхні одиничної сфери. Тут видно, що
    % розподіл крапель – переважно горизонтальний
end

```



Перетворюємо систему координат

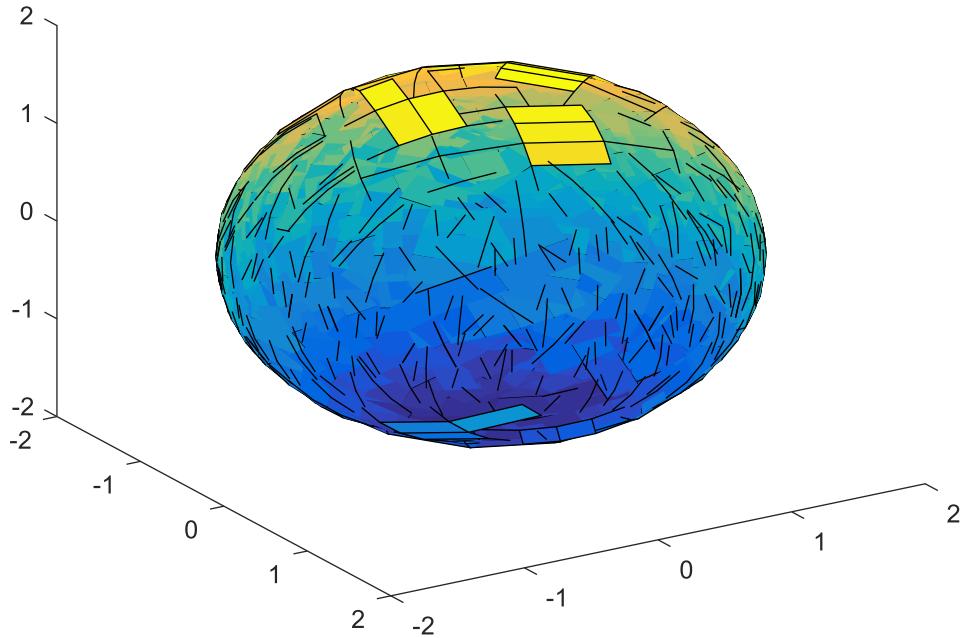
```
[alphaU deltaU R]=cart2sph(X,Y,Z); % Переходимо від декартової системи
% координат до сферичної
```

```
alpha=pi/2+alphaU;
delta=3*pi/2-deltaU;
% Перетворюємо кути alpha і delta відповідно до тих,
% що використовуються у формулах 2.51-2.53 глави 2 дисертації
```

```
phi=0; % Задаємо кут повороту горизонтальної площини поляризації
teta=teta_deg*pi/180; % Переводимо з градусів в радіани
```

Малюємо сукупність крапель із заданим розподілом у просторі

```
if s==0 % Перевірка, чи був даний графік вже намальований
    figure;
    hold on
    for i=1:length(alpha)
        illustrate(alpha(i),delta(i),0,0,3);
        % Ця функція малює еліпсоїд із заданими співвідношенням сторін
        % і положенням у просторі
    end
    axis([-2 2 -2 2 -2 2]);
end
s=1;
% На цьому графіку також видно, що розподіл - переважно горизонтальний
```



Обчислюємо значення поляриметричних параметрів

```

for i=1:k_min
    [hh vv hv]=q(alpha(i),delta(i),phi,teta,L);
    Phh_drops(j,i)=Phh_drops(j,i)+hh*N_fun_drops(fun_d(L))*fun_sigma(fun_d(L));
    Pvv_drops(j,i)=Pvv_drops(j,i)+vv*N_fun_drops(fun_d(L))*fun_sigma(fun_d(L));
    Phv_drops(j,i)=Phv_drops(j,i)+hv*N_fun_drops(fun_d(L))*fun_sigma(fun_d(L));

end
ZDR_drops(j,1)=10*log10(sum(Phh_drops(j,1:k_min))/sum(Pvv_drops(j,1:k_min)));
% Обчислюємо значення ДВ для сукупності частинок

LDR_drops(j,1)=10*log10(sum(Phv_drops(j,1:k_min))/sum(Pvv_drops(j,1:k_min)));
% Обчислюємо значення ЛДВ для сукупності частинок

Rho=corrcoef(Phh_drops(j,:),Pvv_drops(j,:));
Rho_drops(j)=Rho(1,2);
% Обчислюємо значення КК для сукупності частинок

j=j+1;

```

```

end
% Переходимо до розрахунків для наступного кута місця

```

Будуємо графіки функцій

```

angles=0:20:180;

figure; % Створюємо нове вікно

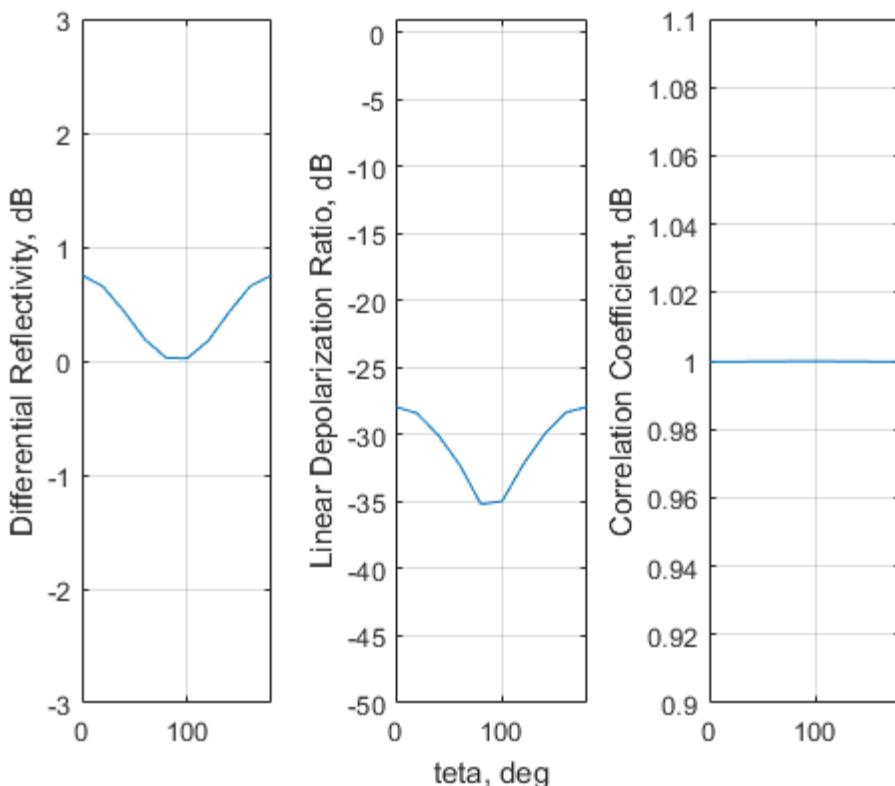
subplot(1,3,1), plot(angles,ZDR_drops),
ylabel('Differential Reflectivity, dB');

```

```
% Будуємо графік залежності дв від кута сканування антени радіолокатора
grid on;
axis([0 180 -3 3])

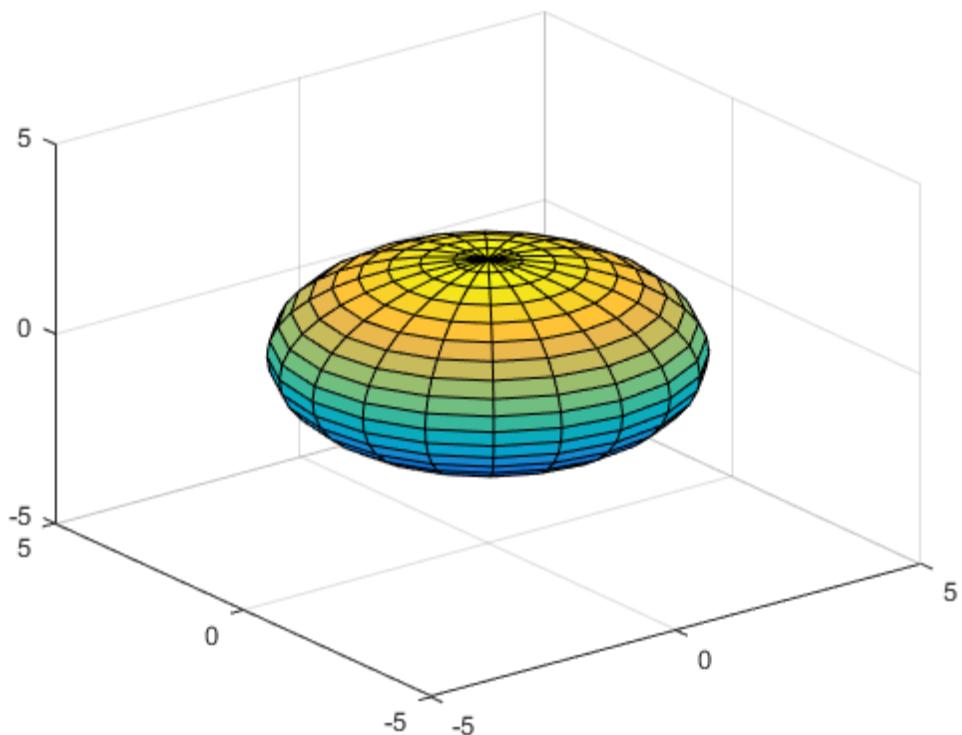
subplot(1,3,1), plot(angles,Differential_Reflectivity),
xlabel ('teta, deg'), ylabel('Differential Reflectivity, dB');
% Будуємо графік залежності лдв від кута сканування антени радіолокатора
grid on;
axis([0 180 -50 1]);

subplot(1,3,2), plot(angles,LDR_drops),
ylabel('Linear Depolarization Ratio, dB');
% Будуємо графік залежності кк від кута сканування антени радіолокатора
grid on;
axis([0 180 0.9 1.1]);
```



Малюємо зовнішній вигляд еліпсоїда, що підміняє форму краплі дощу

```
figure;
a1=fun_a1(L);
a3=fun_a3(L);
[x,y,z] = ellipsoid(0,0,0,a1,a1,a3,20);
h=surf(x,y,z);
axis([-5 5 -5 5 -5 5]);
```



Додаткові функції, що викликаються:

```
function z = A1 (L)
% Ця функція обчислює електромагнітні коефіцієнти форми еліпсоїда
global eps_r; z = 1 ./ (1 + lambda1 (L) . * (eps_r-1));
end
```

```
function z = A3 (L)
% Ця функція обчислює електромагнітні коефіцієнти форми еліпсоїда
global eps_r; z = 1 ./ (1 + lambda3 (L) . * (eps_r-1));
end
```

```
function z = beta (L)
% Ця функція визначає ступінь "сплюснутості" еліпсоїда
z = fun_a1 (L) ./ fun_a3 (L);
end
```

```
function z = fun_a1 (L)
% Ця функція обчислює довжини двох другорядних піввісь сфероїда
z = fun_d (L) / 2;
end
```

```

function z = fun_a3 (L)
% Ця функція обчислює довжину головної півосі сфeroїда

z = L. / 2;
end

function z = fun_d (L)
% Ця функція визначає залежність діаметра частинки від довжини

% Для голчастих кристалів
% z = 0.006 * L. ^ 0.52;

% Для стовпчастих кристалів
z = 0.1 * L. ^ 0.93;

% Для пластинчастих кристалів
% z = (100 * L). ^ (1 / 0.42);

% Для рідких крапель
% z = L ./ (0.5 * (exp (- (L. ^ 2) / 27)) + 0.5);
end

function sigma = fun_sigma (L)
% Ця функція розраховує ЕПР еліпсоїда згідно з формулою Релея

global wavelength;
global eps_r; sigma = (pi ^ 5 * L ^ 6) / wavelength.^4 * (((eps_r-1) / (eps_r + 2)) ^ 2);

end

function z = illustrate (alpha, delta, phi, teta, L)
% Ця функція малює еліпсоїд із заданими спiввiдношеннями сторiн
% i положенням в просторi

a1 = fun_a1 (L); a3 = fun_a3 (L); [x, y, z] = ellipsoid (0,0,0, a1, a1, a3,20); h = surf
(x, y, z);

% Axis ([- 1 1 -1 1 -LL]);
center = [0 0 0]; dir1 = [1 0 0]; rotate (h, dir1, radtodeg (delta), center); dir2 = [0 0
1]; rotate (h, dir2, radtodeg (alpha), center ); z = [phi_hh (alpha, delta, phi, teta)
phi_vv (alpha, delta, phi, teta)];
```

```

function z = lambda3 (L)
% Ця функція перевіряє, чи є сфероїд витягнутим або сплюсненим

if beta (L) <1 && beta (L)> 0 z = ((1-E (L). ^ 2) ./ (E (L). ^ 2)). * (- 1 + (1 /
...
(2. * E (L))). * Log ((1 + E (L)) ./ (1-E (L)));

```

```

else
z = ((1 + f (L). ^ 2) / f (L). ^ 2). * ...
(1- (1./f (L)). * Atan (f (L)));
end

function z = E (L) z = sqrt (1-beta (L). ^ 2);

function z = f (L) z = sqrt (beta (L). ^ 2-1);

```

```

function Z = N_fun (L)
% Ця функція визначає формулу розподілу часток за розмірами

Z = 1000. * L. ^ - 2.3;
end

```

```

function z = phi_hh (alpha, delta, phi, teta)
% Ця функція задає формулу 2.51 глави 2 дисертації

z = (sin (delta). ^ 2). * (cos (alpha). ^ 2). * (sin (phi). ^ 2). * (sin (teta). ^ 2) +...
(sin (delta). ^ 2). * (sin (alpha). ^ 2). * (Cos (phi). ^ 2) + (cos (delta). ^ 2). * ...
(sin (phi). ^ 2). * (cos (teta). ^ 2) -0.5. * Sin (2. * delta). * cos (alpha). * ...
(sin (phi). ^ 2). * sin (2. * teta) -0.5. * sin (2. * delta). * sin (alpha). * ...
sin (2. * phi). * cos (teta) +0.5. * (sin (delta). ^ 2). * sin (2. * alpha). * ...
sin (2. * phi). * sin (teta);
end

```

```

function z = phi_vv (alpha, delta, phi, teta)
% Ця функція задає формулу 2.52 глави 2 дисертації

z = (sin (delta). ^ 2). * (cos (alpha). ^ 2). * (cos (phi). ^ 2). * (sin (teta). ^ 2) +...
(sin (delta). ^ 2). * (sin (alpha). ^ 2). * (sin (phi). ^ 2) + (cos (delta). ^ 2). * ...
(Cos (phi). ^ 2). * (cos (teta). ^ 2) -0.5. * Sin (2. * delta). * cos (alpha). * ...
(cos (phi). ^ 2). * sin (2. * teta) + 0.5. * sin (2. * delta). * sin (alpha). * ...
sin (2. * phi). * cos (teta) -0.5. * (sin (delta). ^ 2). * sin (2. * alpha). * ...
sin (2. * phi). * sin (teta);
end

```

```

function z = phi_hv (alpha, delta, phi, teta)
% Ця функція задає формулу 2.53 глави 2 дисертації

z = (0.5. * sin (2. * phi). * ((sin (delta). ^ 2). * (sin (alpha). ^ 2) - (sin (delta). ^
2). * ...
(Cos (alpha). ^ 2). * (sin (teta). ^ 2) - (cos (delta). ^ 2) -sin (2. * delta). * ...

```

```
cos (alpha). * sin (2. * teta)) - 0.5. * cos (2. * phi). * ((sin (2. * alpha). * ...
(sin (delta). ^ 2). * sin (teta) -sin (2. * delta). * sin (alpha). * cos (teta)));
end
```

```
function [Qhh, qvv, qhv] = q (alpha, delta, phi, teta, L)
% Ця функція обчислює відносну потужність прийнятого сигналу на різних
% поляризаціях
```

```
qhh = ((A1 (L) + (A3 (L) -A1 (L)). * phi_hh (alpha, delta, phi, teta))). ^ 2; qvv = ((A1
(L) + (A3 (L) -A1 (L)). * phi_vv (alpha, delta, phi, teta))). ^ 2; qhv = ((A3 (L) -A1
(L)). * phi_hv (alpha, delta, phi, teta)). ^ 2;
```

```
end
```