

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Пітерцев Олександр Андрійович**

УДК 681.518.2:004.942:621.3.095.1:551.57

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

05.13.06 – «інформаційні технології»

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**КИЇВ - 2017**

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано у Національному авіаційному університеті  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки  
завідувач кафедри електроніки  
Національного авіаційного університету  
**Яновський Фелікс Йосипович.**

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри кібербезпеки та захисту інформації  
університету імені Тараса Шевченка  
**Оксіюк Олександр Глібович,**

доктор технічних наук, професор,  
заслужений винахідник України,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж  
Національного аерокосмічного університету  
ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»  
**Харченко В'ячеслав Сергійович**

Провідна установа:  
Національний авіаційний університет

Захист відбудеться « 08 » лютого 2018 р. о 13:30 на засіданні спеціалізованої вченої ради  
Д26.062.01 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ,  
проспект Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці університету.

Автореферат розіслано « 14 » грудня 2017 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук

Ю.П. Бойко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 відбуваються кількісні та якісні зміни в інформаційному забезпеченні пілотів та бортових систем повітряних суден (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 радіолокації справило потужний вплив на якість метеорологічної інформації завдяки працям таких учених, як D. Atlas, L. Battan, E. Kessler, R. Lermite, 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 доплеровських і поляризаційних методів у метеорологічній радіолокації зробили V. Bringi, V. Chandrasekar, R. Doviak, A. Illigworth, L. Ligthart, H. Russchenberg, D. Zrníc, Д.М. Ваврів, А.В. Рижков, Г.І. Хлопов, А.Б. Шупяцький, Ф.Й. Яновський, та ін. 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 аеронавігаційного 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.

Одним з найбільш небезпечних для польотів явищ є обледеніння – метеорологічне явище, до якого можуть бути схильні будь-які типи літаків і вертольотів, 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 контакті холодного матеріалу обшивки з атмосферною вологою. Визначення зон небезпечного обледеніння (ЗНО) 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 та Федеральним авіаційним управлінням США зафіксовано 645 авіаційних подій з причини обледеніння. Система звітності NASA (Національне управління з аеронавтики і космосу) з безпеки польотів містить записи про 30 пригод за період 2006–2010 рр, спричинених наявністю умов обледеніння ПС у польоті. Більш того, якщо великі магістральні авіалайнери мають у своєму арсеналі достатньо засобів боротьби з обледенінням, дрібні і середні ПС істотно їм

поступаються в цьому сенсі. А для безпілотних літальних апаратів навряд чи можливе розміщення протиобліднювальних систем взагалі через невеликі габарити і вантажопідйомність.

Тема дисертаційної роботи є важливою, оскільки присвячена підвищенню безпеки польотів ПС за допомогою методів визначення ЗНО, що ґрунтуються на інформації дистанційного зондування простору по курсу польоту ПС. Вона відкриває 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 в тропосфері. Основою запропонованих методів є поляриметричний підхід до отримання інформації про стан досліджуваних об'єктів, що ґрунтується на вимірюванні й обробленні таких інформативних параметрів, як диференціальна відбиваність, лінійне деполаризаційне відношення та коефіцієнт кореляції при нульовому зсуві. Вони дозволяють отримувати інформацію про форму, типи і кількісний розподіл гідрометеорів у складі хмар і опадів. Розроблення методів виявлення ЗНО 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, зони небезпечної турбулентності, зсуву вітру та інші. 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 співавтор розділу «Аналіз методів обробки сигналів і даних в поляриметричних метеорологічних радіолокаторах» звіту по НДР № 63 / 08.01.01 «Обробка сигналів, зображень та даних в радіоелектронних системах», яка виконувалася кафедрою електроніки НАУ в 2010–2015 рр. 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 році були виконані експерименти з дистанційного зондування опадів у WUT – Політехніка Варшавська, Польща.

**Мета та 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. Зазначена технологія складається з *методу оцінювання поляриметричних інформативних параметрів зон небезпечно обледеніння, методу класифікації небезпечних метеорологічних явищ та методу багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння повітряних суден*, основною яких є теорія поляриметричного аналізу інформаційних сигналів, отриманих під час сканування простору на базі бортових систем та комплексів.

Досягнення поставленої мети **передбачає розв'язання таких завдань:**

1. Виконати аналіз умов виникнення зон небезпечно обледеніння повітряних суден.
2. Розробити математичну модель перетворення та оброблення сигналів бортової метеорологічної інформаційної системи та розробити метод оцінювання поляриметричних інформативних параметрів зон небезпечно обледеніння.
3. Удосконалити метод класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової інформаційної системи шляхом додавання процедури ідентифікації нового класу об'єктів – зон небезпечно 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 методіку 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 підтверджені результатами натурних експериментів з використанням експериментальних даних доплерівсько-поляриметричних радіолокаторів і обробленням даних у середовищі MatLab.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що в дисертації:

- 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.

- 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.

- 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.

- 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.

- Удосконалено 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.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в такому:

- Удосконалено числові методи розрахунку поляриметричних параметрів електромагнітних хвиль, відбитих від крижаних кристалів і крапель переохолодженої води в Х-діапазоні частот (9345...9375 МГц,  $\lambda = 3,2$  см). Показано варіанти впорядкованої просторової орієнтації

гідрометеорів з математичним сподіванням  $0 \dots 90^\circ$  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  $-14 \dots -24$  дБ, для диференціальної відбиваності – у діапазоні  $-4 \dots -4$  дБ, для коефіцієнта кореляції – у межах  $0,8 \dots 1$ , що дозволило підвищити якість оброблення метеорологічної інформації.

- *Метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою базової метеорологічної інформаційної системи* доповнено новим класом небезпечних явищ – зоною потенційного обледеніння. Так, у загальносвітовому 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 попередити 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  $0,5 \dots 3,5$  дБ, лінійне диференціальне відношення менше за  $-34$  дБ, значення коефіцієнта кореляції більше від 0,95, висота польоту в межах  $3 \dots 6$  км, швидкість менша за 700 км/год, температура повітря у межах  $-20 \text{ }^\circ\text{C} \dots 0 \text{ }^\circ\text{C}$  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 заявки на винаходи й отримано патенти:
  - спосіб виявлення ЗНО літаків і вертольотів [28];
  - пристрій для виявлення ЗНО літаків і вертольотів [29].
- Наведені у дисертації розрахунки поляриметричних параметрів електромагнітних хвиль, що відбивається від складних метеорологічних утворень, є корисними для практичного застосування в:
  - інформаційному метеорологічному забезпеченні 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 небезпечного 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.

**Об'єктивний внесок здобувача.** Безпосередньо автором дисертації створено математичну модель, що дозволяє розраховувати поляриметричні параметри сигналу, відбитого від різних типів хмарних частинок і з 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 [1,

5] наведено уточнені формули, що описують поляриметричні параметри радіолокаційного сигналу, відбитого від еліптичних розсіювачів; у [13] 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 [6] проведено теоретичний аналіз оцінювання ефективності різних алгоритмів виявлення ЗНО; у [7] обґрунтовано межі застосування алгоритмів виявлення небезпечних для польоту зон на підставі наявних моделей їх формування; у [2] виконано поглиблений аналіз причин формування ЗНО та їх впливу на ПС під час польоту; у [8] наведено основні тези поляриметричного підходу до процесу виявлення ЗНО; у [19, 20] показано можливість побудови математичних моделей, що описують поляриметричні параметри сигналу, відбитого від рідких крапель і кристалів льоду; у [15, 18, 19] наведено теоретичні оцінювання поляриметричних параметрів радіолокаційних сигналів, відбитих від сукупності (хмари) частинок різних типів; в інших публікаціях [1 – 27], що не описані детально вище, 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 PARSAX (Нідерланди). Результати перевірки прийнятну 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 (ММЕТ 2004), Дніпропетровськ, Україна; International Workshop on Microwaves, Radar and Remote Sensing (МRRS 2005), Київ, Україна; The 2nd European Microwave Week (EuMW-2005), Париж, Франція; The 11th Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ 2006), Харків, Україна; The 3rd European Radar Conference (EuRad-2006), Манчестер, Великобританія; IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (МRRS-2011), Київ, Україна; 14-я Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні Інформаційні та Електронні Технології» СІЕТ 2013, Одеса, Україна; The 8th European Radar Conference (EuRad-2013), Нюрнберг, Німеччина; The 10th Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ 2014 року), Дніпропетровськ, Україна; IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (МRRS-2014), Київ, Україна; International Radar Symposium (IRS-2015), Дрезден, Німеччина. 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 дисертації отримано 2 патенти України [28, 29].

**Публікації.** Основні положення і зміст дисертації відображено 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 216 сторінок, включаючи 105 рисунків і 8 таблиць, список використаних джерел з 123 найменувань на 9 сторінках та 47 сторінок додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, цілі та завдання дослідження, при цьому окремо виділено перелік завдань дослідження, об'єкт та предмет дослідження і методи дослідження. Показано наукову новизну, практичне значення отриманих результатів. Підтверджено достовірність наукових результатів

і виділено особистий внесок здобувача. Наведено інформацію про апробацію результатів дисертації, публікацій, структури та обсягу.

У **першому розділі** наведено термінологічну базу та визначення основних понять у сфері захисту від обледеніння літаків і вертольотів, проаналізовано вплив обледеніння на аеродинамічні якості ПС і безпеку польотів. Показано, що першою і основною причиною обледеніння є замерзання переохолоджених крапель, які стикаються з поверхнею літака. Другою причиною є безпосереднє відкладення крижаних кристалів (сублімація) на поверхні літака. Досліджено вплив різних факторів ПС та навколишнього середовища на можливість виникнення ЗНО. Показано актуальність проблеми раннього виявлення ЗНО, виконано постановку завдання ранньої діагностики зон потенційного обледеніння з борта ПС.

Додатково у першому розділі проаналізовано такі аспекти функціонування пристрою для діагностики потенційної ЗНО, як робочий діапазон частот, дальність дії, тип антени. На підставі наведеної інформації, зроблено висновок, що одним з найбільш перспективних для практичної реалізації поставлених завдань є поляриметричний підхід до оброблення сигналів бортової метеорологічної інформаційної системи. Показано, що в результаті оброблення сигналів і аналізу відмінностей потужності зворотного розсіяння при випромінюванні ортогонально поляризованих імпульсів може бути отриманий великий обсяг інформації про частинки, що містяться в межах досліджуваного об'єму простору. Зокрема, може бути отримана інформація про форму та розміри частинок, їх щільність у хмарі, тип, стан та ін.

Структурно-логічні схеми інформаційних технологій розпізнавання небезпечних метеорологічних явищ на базі існуючих методів та за допомогою поданих у дисертації нових методів попередження про небезпечні зони потенційного обледеніння ПС показано на рис. 1.1. На тьому фоні виділено нові методи, що має бути розроблено для розпізнавання ЗНО.

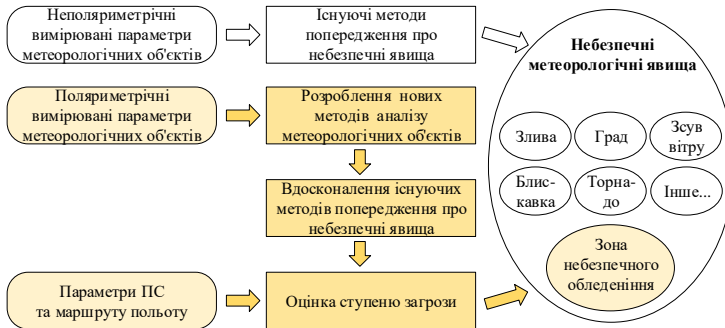


Рис. 1.1. Структурно-логічні схеми інформаційних технологій розпізнавання небезпечних метеорологічних явищ

У **другому розділі** розроблено математичну модель, що дозволяє виконувати розрахунки поляриметричних параметрів сигналу, відбитого від складних метеорологічних цілей що містять краплі дощу, краплі переохолодженої води у складі хмари, кристали льоду, шар танення та сукупність цих частинок у різних пропорціях. На базі моделі створено *метод оцінювання інформативних поляриметричних параметрів зон небезпечного обледеніння*. Так було показано, що якщо діаметр  $D$  частинки, що опромінюється, значно менший від довжини падаючої хвилі  $\lambda$ , то частинку можна вважати релєвським розсіювачем, і її ефективну площу зворотного розсіювання (ЕПР)  $\sigma$  оцінити за допомогою формули:  $\sigma \approx (\pi^5 / \lambda^4) |K|^2 D^6$ , де  $K$  – комплексний коефіцієнт заломлення речовини частинки. Величина  $|K|^2$  для води дорівнює приблизно 0,93, а для льоду – 0,19. Оскільки в об'ємі відбиття міститься велика кількість ре-



леївських частинок різного розміру, то питома ЕПР на одиницю об'єму  $\sigma_0$  на дальності  $R$  визначається як:  $\sigma_0 = (\pi^5 / \lambda^4) |K|^2 Z$ , де величина  $Z$  – радіолокаційна відбиваність для об'єму, що відбиває сигнал і перебуває на дальності  $R$ , визначається виразом:

$$Z(R) = \int_0^{\infty} N(D, R) D^6 dD, \text{ де } N - \text{кількість розсіювачів у досліджуваному об'ємі простору.}$$

Для розрахунку ефективної поверхні розсіювання електромагнітної хвилі, відбитої від деякого об'єму, заповненого гідрометеорами, використовується вираз

$$\sum_{ri} = f(\sigma_{ri}(D_e, \delta, \alpha, \theta, \Lambda, \varepsilon), p(D_e, \delta, \alpha, \theta, \Lambda, \varepsilon)), \quad (2.1)$$

де  $\sigma_{ri}(D_e, \delta, \alpha, \theta, \Lambda, \varepsilon)$  – ЕПР одиничного гідрометеора з  $ri$  поляризацією, де  $r$  і  $i$  описують поляризацію переданої і прийнятої хвиль відповідно, а  $p(D_e, \delta, \alpha, \theta, \Lambda, \varepsilon)$  – об'єднана щільність ймовірності існування розсіювача з еквівалентним діаметром  $D_e$ , кутом повороту навколо вертикальної осі  $\alpha$ , кутом нахилу відносно вертикальної осі  $\delta$ , вектором параметрів форми  $\Lambda$ , діелектричною проникністю  $\varepsilon$ , і кутом нахилу антени радіолокатора відносно площини горизонту  $\theta$ . Інтегрування у формулах береться по всьому діапазону значень змінних. Так, для ефективного діаметра розсіювача  $D_e$  межі інтегрування будуть від мінімального значення еквівалентного діаметра еліпсоїда  $D_{e \min}$  (близько 0,01 мм) до максимального  $D_{e \max}$ . Величина  $D_{e \max}$  може сягати значень порядку 0,8 мм для смарних крапель, 2 мм для крапель дощу, і декількох міліметрів для крижаних кристалів. По кутах нахилу  $\alpha$  і  $\delta$  інтегрування здійснюється у межах 0...2 $\pi$ . Імовірності відхилення орієнтації частинок у просторі від початкового положення  $p(\alpha)$  і  $p(\delta)$  задають імовірність того, що кути відхилення координатної осі набувають значення  $\alpha$  і  $\delta$  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 набувають переважно горизонтальне положення, створюючи максимальний опір зустрічному потоку повітря під час падіння. Основні інформативні поляриметричні параметри, які використовувались, наведені нижче:

1. Радіолокаційна відбиваність при горизонтальній поляризації  $Z_H = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \langle |s_{hh}|^2 \rangle, \quad (2.2)$

2. Радіолокаційна відбиваність при вертикальній поляризації  $Z_V = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \langle |s_{vv}|^2 \rangle, \quad (2.3)$

3. Диференціальна відбиваність  $Z_{DR} = 10 \log \frac{|s_{hh}|^2}{|s_{vv}|^2}, \quad (2.4)$

4. Лінійне деполаризаційне відношення  $LDR_{hv} = 10 \log \frac{|s_{hv}|^2}{|s_{vv}|^2}, \quad (2.5)$

5. Кореляційний коефіцієнт при нульовому зсуві  $\rho_{hv}(0) = \frac{\langle s_{vv} s_{hh}^* \rangle}{\langle |s_{hh}|^2 \rangle^{\frac{1}{2}} \langle |s_{vv}|^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}, \quad (2.6)$

6. Питома диференціальна фаза  $K_{DP} = \frac{\varphi_{DP}(R_1) - \varphi_{DP}(R_2)}{2(R_2 - R_1)}. \quad (2.7)$

де  $R_1$  і  $R_2$  – дальності до двох об'ємів простору ( $R_1 < R_2$ );  $s_{ij}$  – елементи матриці зворотного розсіювання, де перший індекс позначає поляризацію хвилі, що випромінена у напрямку цілі, а другий індекс – поляризацію прийнятої хвилі.

У роботі визначено ряд параметрів радіолокатора і цілі (2.1...2.7), які були використані для побудови математичної моделі відбиття сигналів від метеорологічного об'єкта. Ці параметри включають в себе координати окремої частинки у сферичній системі координат відносно початкового положення:  $\alpha$  – кут повороту частинки в горизонтальній площині;  $\delta$  – кут повороту частинки у вертикальній площині;  $\varphi$  – кут повороту частинки у фронтальній площині, або кут поляризації;  $\theta$  – кут нахилу радіолокатора до площини горизонту.

Система координат при цьому прив'язана до частинки, а не до спостерігача. Як модель розсіювача використано еліпсоїди з відомими співвідношеннями між півосями  $a_1$  і  $a_2 = a_3$ , а також заданими кутами повороту  $\alpha$ ,  $\delta$ , кутом нахилу площини поляризації  $\varphi$ , і кутом повороту антени радіолокатора відносно площини горизонту  $\theta$ . Спочатку було досліджено варіант абсолютно хаотичної орієнтації розсіювачів у досліджуваному об'ємі простору – це може спостерігатися, наприклад, унаслідок сильної турбулентності повітряних потоків у хмарі (рис. 2.1). Орієнтацію частинки позначено за допомогою точки перетину вертикальної осі еліпсоїда з одиничною сферою (при цьому центр сфери збігається з геометричним центром еліпсоїда,

яким підміняється реальна форма частинки). Тоді задача опису абсолютно хаотичного розподілу частинок у просторі (рис. 2.1) може бути графічно зображена у вигляді задачі рівномірного розподілу точок на поверхні одиничної сфери. Ця задача була проаналізована і розв'язана для різних варіантів просторової орієнтації розсіювачів. Далі досліджувалися варіанти не рівномірної (хаотичної), а частково впорядкованої орієнтації розсіювачів у просторі (рис. 2.2, 2.3, 2.4). В такому випадку гідрометеори орієнтуються у просторі так, щоб надавати максимальний опір під час падіння, а розподіл їхньої орієнтації у вертикальній площині можна описати за допомогою нормального закону розподілу. При цьому можна виділити дві найбільш типові ситуації: 1) Турбулентність незначна або відсутня; *розсіювачі орієнтовані переважно горизонтально*, тобто у вертикальній площині розподіл кутів нахилу осей описується нормальним законом розподілу з математичним сподіванням  $0^\circ$  і деякою дисперсією, яка залежить від ступеня турбулентності, а в горизонтальній площині розподіл кутів повороту вважається рівномірним. 2) Наявне сильне електричне поле, під дією якого *розсіювачі прагнуть вишикуватись вертикально*, або під деяким кутом до горизонту.

Варіанти просторового розподілу гідрометеорів при переважно горизонтальній орієнтації частинок для витягнутих і сплюснених еліпсоїдів, що підміняють форму реальних частинок, показано на рис. 2.2 і 2.3. Останньою розглянуто ситуацію, коли гідрометеори орієнтовані переважно вертикально внаслідок впливу зовнішнього електричного поля хмари (рис. 2.4).

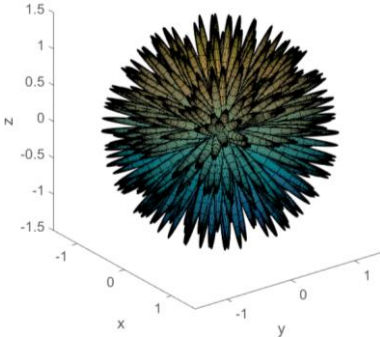


Рис. 2.1. Сукупність положень частинки в просторі за рівномірного (хаотичного) розподілу поздовжньої осі

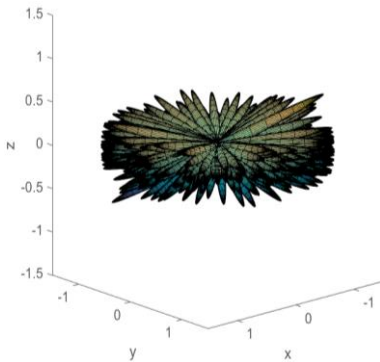


Рис. 2.2. Сукупність положень частинки в просторі за переважно горизонтальної орієнтації. Тип частинок – крижані голки

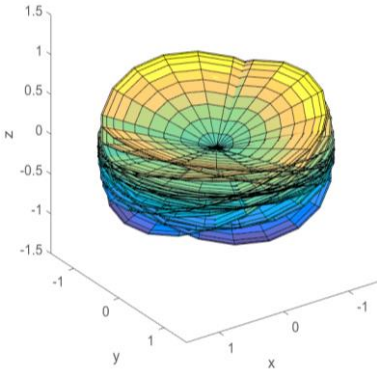


Рис. 2.3. Сукупність положень частинки в просторі за переважно горизонтальної орієнтації. Тип частинок – крижані пластинки

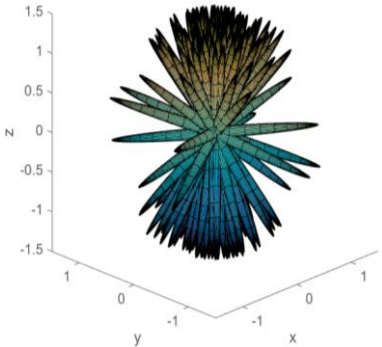


Рис. 2.4. Сукупність положень частинки в просторі за переважно вертикальної орієнтації. Тип частинок – крижані голки

надає базу для створення методів розпізнавання зон потенційного обледеніння літаків, і, таким чином, підвищення безпеки польотів ПС.

У **третьому розділі** проведено верифікацію *методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів зон небезпечного обледеніння*, опрацьовано і проаналізовано експериментальні дані, отримані під час виконання ряду незалежних вимірювань, виконаних в різних умовах, і вдосконалено *метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи* шляхом додавання процедури визначення нового класу об'єктів – ЗНО. 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 – IR CTR*) при Делфтському технічному університеті (*TU-Delft*) із залученням технічної бази: протягом 1996–2001 рр. за допомогою поляриметричних радіолокаторів DARR і TARA, що

На базі створеної математичної моделі відбиття виконано розрахунки, визначено області значень поляриметричних параметрів, які дозволятимуть ідентифікувати тип гідрометеорів у складі хмари і розроблено *метод оцінювання поляриметричних інформативних параметрів ЗНО*. Розрахунки проводилися для двох варіантів кристалічної хмари: максимальний розмір частинок у якому дуже малий (0,1 мм) і дуже великий (досягає 8 мм), див. табл. 2.1, для дощу, а також для шару танення.

Таблиця 2.1

Тип частинки	ЛДВ $LDR_{lv}$ , 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

Частинки в шарі танення по суті являють собою крижані кристали, покриті водяною плівкою. Це робить малоімовірним існування дуже тонких або пласких частинок, тому для розрахунку відбитих сигналів від шару танення обрано тип частинок – стовпчики (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

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

*Примітка:* у табл. 2.1 і 2.2 ЛДВ – Лінійне деполаризаційне відношення, ДВ – Диференціальна відбиваність, КК – Кореляційний коефіцієнт

Структурно-аналітичну схему *методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО* показано на рис. 2.5. Як можна бачити з рис. 2.5, зазначений метод дозволяє оцінювати основні поляриметричні інформативні параметри відбитого сигналу бортової інформаційної метеорологічної системи, що

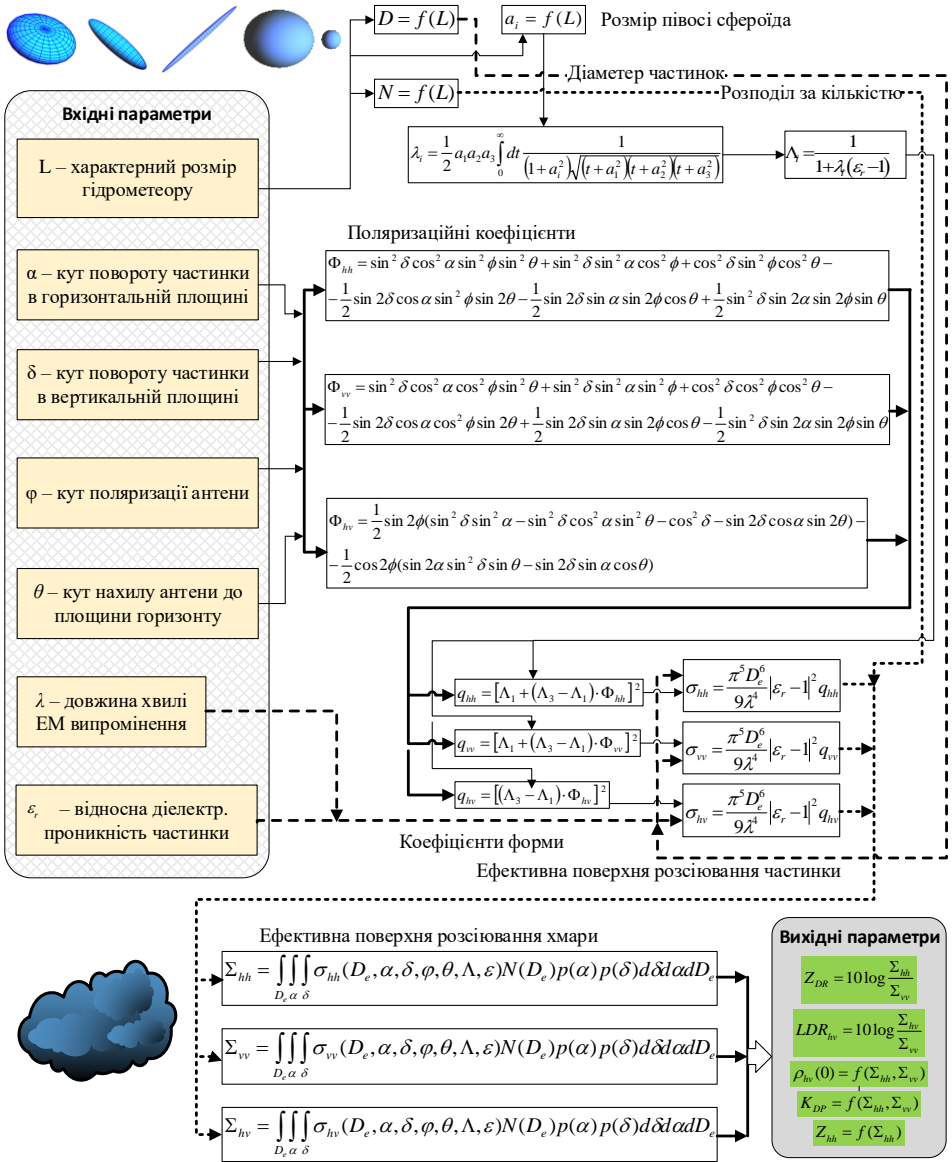


Рис. 2.5. Структурно-аналітична схема методу оцінювання інформативних поляриметричних параметрів ЗНО

працюють у S-діапазоні (несна частота 3,315 ГГц); протягом 2008–2014 рр. за допомогою поляриметричного радіолокатора із швидкою перестроюючою поляризацією і високою роздільною здатністю PARSAX, що працює в S- і X-діапазонах (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.

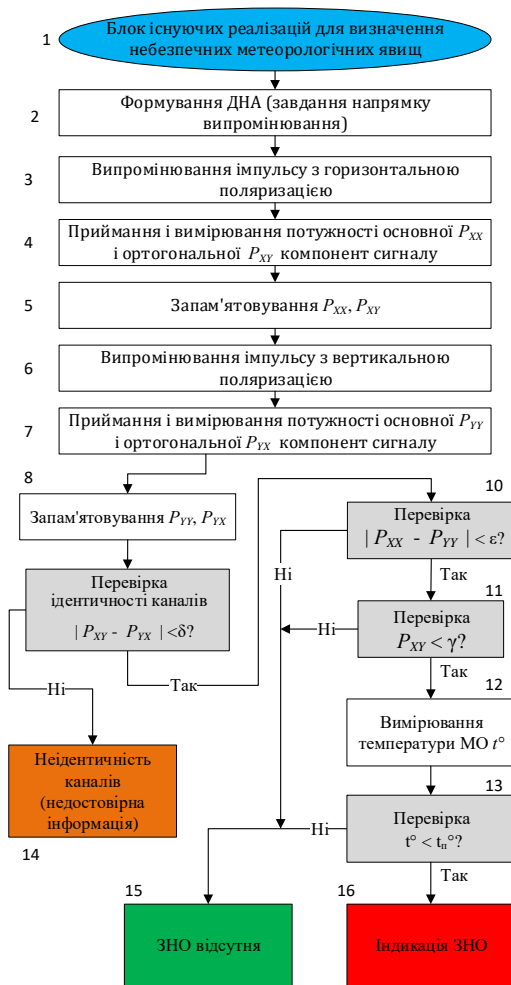


Рис. 3.1. Структурно-логічна схема послідовності реалізації для визначення зон небезпечного обледеніння за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи

дорівнює температурі замерзання води і одночасно виконуються умови  $P_{xx} = P_{yy}$  і  $P_{xy} = P_{yx} = 0$ , де перший індекс позначає поляризацію випроміненої, а другий – прийнятої компоненти сигналу.

3) Випромінюються імпульс електромагнітних коливань (блок 3) заданої поляризації, наприклад, горизонтальної  $X$ . Тривалість імпульсу вибирається, виходячи з необхідної роздільної здатності за дальністю.

4) Вимірюється потужність кожної з двох отриманих ортогональних компонент відбитого сигналу  $P_{xx}$  і  $P_{xy}$ . Потім те ж саме повторюється з вертикальною поляризацією зондувального імпульсу (блоки 4...8).

5) Визначається модуль різниці  $|P_{xy} - P_{yx}|$  і порівнюється із граничним значенням  $\delta$  (блок

У третьому розділі також запропоновано логічну послідовність реалізації для визначення зон небезпечного обледеніння за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи (рис. 3.1), і проаналізовано вимоги до порогових рівнів її основних параметрів. Ця послідовність удосконалює метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи шляхом додавання нового класу об'єктів – зон небезпечного обледеніння, що надає можливість розширити перелік небезпечних метеорологічних явищ, що може бути діагностовано в оперативному режимі під час польоту ПС, а отже може підвищувати безпеку польотів. Ця послідовність реалізації виглядає наступним чином:

1) По черзі випромінюються горизонтально  $X$  поляризовані і 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 та відомим значенням температури приймається рішення про наявність чи відсутності ЗНО в досліджуваному об'ємі простору. Якщо температура менша або

9), щоб проконтролювати 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 свідчатиме про недостатню ідентичність каналів вимірювання (блок 14).

6) Якщо виконано умову  $|P_{XY} - P_{YX}| < \delta$ , то визначається модуль різниці основних компонент сигналу  $|P_{XX} - P_{YY}|$  і порівнюється з порогом  $\varepsilon$  (блок 10). Для сферичних частинок, якими в першому наближенні є краплі води, значення  $P_{XX}$  і  $P_{YY}$  мають бути приблизно однакові. Для несферичних частинок, якими є крижані кристали, значення  $P_{XX}$  і  $P_{YY}$  мають 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 зі сферичних крапель води або кристали хаотично (довільно) орієнтовані у просторі, наприклад, через турбулентне перемішування.

7) Наступна операція (блок 11) виконує перевірку  $P_{XX} < \gamma$ , яка дозволяє вилучити припущення про хаотичну орієнтацію кристалів. Наявність несиметричних (несферичних) частинок, навіть хаотично орієнтованих, зумовлює 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, близькість 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  $P_{XY} \approx P_{YX}$  встановлено раніше (блок 9), то досить перевірити на поріг  $\gamma$  одне (будь-яке) із значень  $P_{XY}$ , або  $P_{YX}$ .

8) У такому випадку обледеніння є можливим, якщо краплі є переохолодженими. Це, вирішується за допомогою операцій 12 і 13. Якщо температура об'єкта  $t^\circ$  виявляється нижчою за встановлений пороговий рівень  $t_m$ , 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  $t^\circ \geq t_m$ ) приймається рішення про відсутність ЗНО (блок 15).

У **четвертому розділі** оцінено достовірність виявлення зон ЗНО, за допомогою методу, що подано в попередньому розділі, і вперше розроблено *метод багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння*.

Для початку визначено оптимальні значення параметрів алгоритму за допомогою критерію Неймана-Пірсона. Позначимо простір рішень, у якому існують два стани: 1) *є небезпека обледеніння ПС*, що має на увазі наявність у досліджуваному обсязі метеорологічного об'єкта (хмари) переохолоджених крижаних крапель; 2) *немає небезпеки обледеніння ПС*, коли досліджуваний метеорологічний об'єкт містить, наприклад, крижані кристали.

Припустимо, що щільність ймовірності обох подій описується нормальним (гаусовим) законом розподілу ймовірностей. Тоді позначимо ймовірність правильного виявлення як  $D$ , а ймовірність хибної тривоги як  $F$ . Далі виконаємо розрахунки ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги, використовуючи двопараметричний підхід, з урахуваннями значень ДВ і ЛДВ. Імовірність правильного виявлення  $D$  буде дорівнювати числовому значенню подвійного інтеграла:

$$D = \int_{F_{ZDR}}^{\infty} \int_{-\infty}^{F_{LDR}} p_{drops}(LDR_{drops}, Z_{DR,drops}) dLDR dZ_{DR}, \quad (4.1)$$

а ймовірність хибної тривоги:

$$F = \int_{F_{ZDR}}^{\infty} \int_{-\infty}^{F_{LDR}} p_{crystals}(LDR_{crystals}, Z_{DR,crystals}) dLDR dZ_{DR}. \quad (4.2)$$

Спираючись на результати математичного моделювання, наведені в розділі 2, позначимо область значень  $Z_{DR,drops}$  в діапазоні 0...0,2, формула (4.1); область значень  $Z_{DR,crystals}$  у діапазоні

-1...0, формула (4.2); область значень  $LDR_{drops}$  у діапазоні -30...-50, формула (4.1); область значень  $LDR_{crystals}$  в діапазоні -15...-25, формула (4.2). 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  $LDR$ . У цьому випадку ймовірності правильного виявлення і хибної тривоги можуть становити:  $D = 0,802$ ,  $F = 1,6 \cdot 10^{-7}$ .

Як можна бачити з розрахунків, для підвищення точності локалізації небезпечних для ПС зон доцільно використовувати якомога більше інформативних параметрів, що стосуються об'єкту дослідження і доступні для вимірювання. Для створення надійного алгоритму виявлення ЗНО можна використовувати 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 профіля крила та інші. Ураховувати таку велику кількість факторів, спираючись на класичний підхід з використанням щільності розподілення ймовірностей досить складно, тому в цій роботі запропоновано альтернативний підхід до прийняття рішень щодо наявності або відсутності ЗНО, що базується на використанні математичного апарату нечіткої логіки. Так, у четвертому розділі вперше розроблено *метод багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння* на основі аналізу поляриметричних параметрів відбитого сигналу, параметрів ПС та маршруту (рис. 4.1).

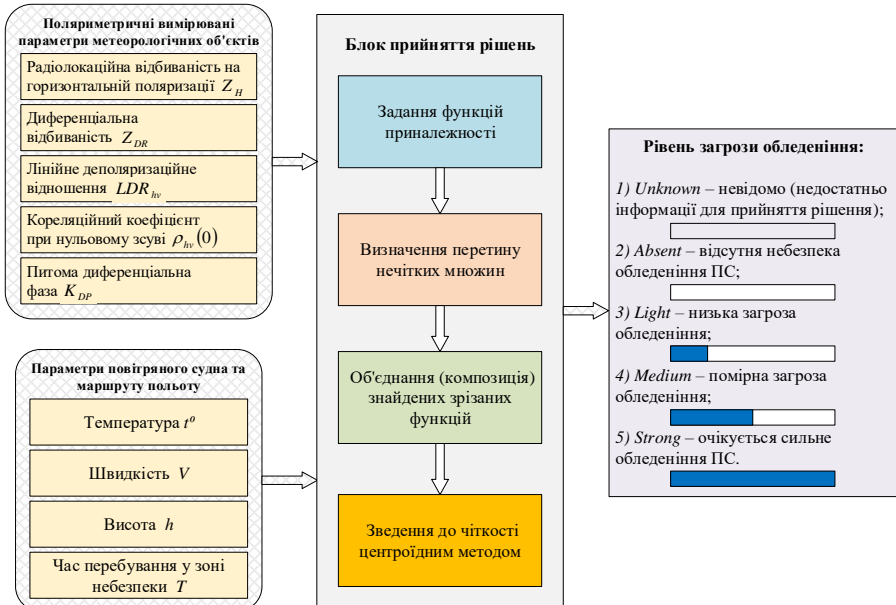


Рис. 4.1. Структурно-логічна схема методу багатопараметричного оцінювання ступеня загрози обледеніння

Для створення моделі прийняття рішень щодо існування та ступеня загрози ЗНО використано такі параметри: радіолокаційну відбиваність при горизонтальній поляризації  $Z_H$ ; диференціальну відбиваність  $Z_{DR}$ ; лінійне деполаризаційне відношення  $LDR_{hv}$ ; кореляцій-

ний коефіцієнт при нульовому зсуві  $\rho_{lv}(0)$ ; питому диференціальну фазу  $K_{DP}$ ; висоту об'єму спостереження  $h$ ; швидкість польоту  $V$ ; температуру повітря  $t^a$ ; час перебування у зоні небезпеки  $T$ .

Виходом нечіткого детектора та класифікатора ступеня небезпеки ЗНО є один з 5 класів: 1) *Unknown* – невідомо (недостатньо інформації для прийняття рішення); 2) *Absent* – немає небезпеки обледеніння ПС; 3) *Light* – низька загроза обледеніння; 4) *Medium* – помірна загроза обледеніння, 5) *Strong* – очікується сильне обледеніння ПС

Зазначений метод є складовою частиною інформаційної технології виявлення зон потенційного небезпечного обледеніння ПС (рис. 4.2). У четвертому розділі показано, що якщо обрані діапазони значень поляриметричних входних змінних, висота польоту та температура метеорологічного об'єкта відповідають умовам існування переохолоджених рідких, швидкість польоту недостатня для кінетичного нагріву корпусу ПС, час перебування у зоні небезпеки досить великий, то 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* зменшиться до 4 або 3. У разі великого зростання швидкості (наприклад, понад 1000 км/год), чи збільшенні температури до 15 °C і вище, або за певної комбінації поляриметричних змінних, що відповідатимуть зоні сильної зливи або зоні кристалів льоду, умови обледеніння ПС не виконуватимуться і на виході детектора значення змінної *icing-level* дорівнюватиме 2, що відповідає відсутності загрози. За невіданих чи суперечливих

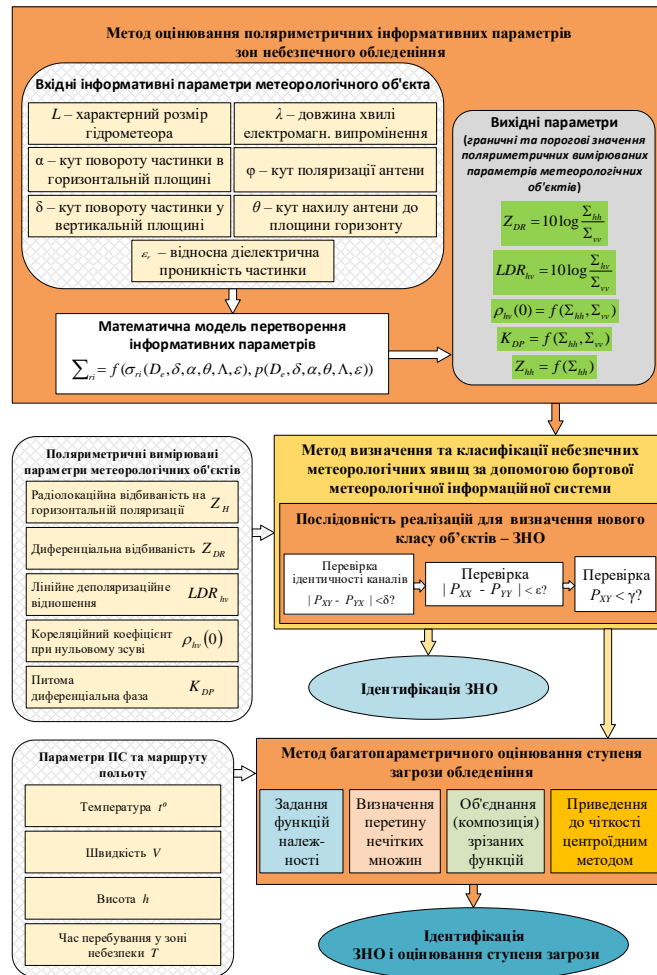


Рис. 4.2. Структурно-аналітична схема інформаційної технології виявлення зон потенційного небезпечного обледеніння повітряних суден



рівнів вхідних параметрів значення  $icing-level = 1$ , що може свідчити про збій у роботі бортового обладнання. Будову наведеного вище детектора та класифікатора ступеня загрози обледеніння на базі математичного апарату нечіткої логіки може бути вдосконалено у майбутньому для пристосування до конкретного типу ПС.

На основі розроблених моделей і методів удосконалено інформаційну технологію підвищення ефективності функціонування інформаційних систем безпеки польотів ПС (рис. 4.2), яка дозволяє виявляти зони потенційного обледеніння повітряних суден під час польоту та надає можливість підвищити безпеку польотів завдяки уникненню цих зон або завчасного попередження пілотів про небезпеку обледеніння повітряного судна. На базі теоретичних досліджень, проведених у роботі, отримано патенти на корисну модель та алгоритми і пристрій виявлення ЗНО [28, 29].

## 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 деполаризаційного відношення у межах діапазону 14... -24 дБ, для диференціальної відбиваності у діапазоні -4...4 дБ, для коефіцієнта кореляції – у межах 0,8...1 дБ.

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 розрізнити 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 удосконалено 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

фіксацію ймовірності правильного виявлення небезпечних зон на рівні  $D = 0,802$  і хибної тривоги відповідно на рівні  $F = 1,6 \cdot 10^{-7}$ .

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Праці, які відображають основні наукові результати дисертації

*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. С. 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. С. 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.: ИРЕ НАН журнал «Радиофизика и электроника». – 2006. – Том 11, № 1. – С. 74-77.

*Наукові публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних 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. – С. 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. // ММЕТ-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. – С. 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. // ММЕТ-2006. – X.: 26-29 червня 2006. – С. 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. – С. 87-90 (Scopus).

12. Pitertsev A. Mathematical Modeling and Simulation of Backscattering from Hydrometeors of Different Types. / Pitertsev A., Yanovsky F. // Conference Proceedings. 10<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – Д.: 14-17 вересня 2004. – С. 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. – С. 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. – С. 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. – С. 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 37<sup>th</sup> European Microwave Conference, 978-2-87487-001-9. – EuMA, Мюнхен, Німеччина: 2007. – С. 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 4<sup>th</sup> 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., Lighthart L.P. // Proceedings 2<sup>nd</sup> 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 37<sup>th</sup> 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 4<sup>th</sup> 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 ISTRP7. – Боулдер, штат Колорадо, США: 11-17 червня 2006. – Paper 6.2, C. 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 ISTRP7. – 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.

## 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.

### **Зміст анотації**

Безпека польотів ПС значною мірою пов'язана із функціонуванням інформаційних систем, що відповідають за попередження про небезпечні метеорологічні явища. Одним з найбільш складних але важливих завдань є підвищення якості функціонування цих систем за рахунок розширення класу явищ, які система може розпізнати і про які пілоти можуть бути завчасно попереджені. Дисертацію присвячено розробленню інформаційної технології підвищення безпеки польотів ПС на базі методів визначення зон потенційного небезпечного обледеніння повітряних суден.

Обледенінням називається небезпечне метеорологічне явище, суть якого становлять процеси відкладення льоду в польоті на різних частинах літака. Воно має багато негативних факторів впливу на безпеку польоту повітряних суден. Вирішення завдання попередження обледеніння повітряних суден у польоті має важливе практичне значення для підвищення безпеки і регулярності пасажирських перевезень у цивільній авіації, а також для зниження витрат.

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 реалізацій 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.

Значний прогрес в алгоритмах оброблення сигналів, який спостерігається в останні роки разом із швидким розвитком електронних обчислювальних засобів надають можливості для застосування більш складних та ресурсоемних методів аналізу радіолокаційних сигналів для сканування метеорологічних об'єктів, а розвиток радіотехнічних засобів надає великі можливості у випромінюванні та прийманні складних радіолокаційних сигналів. Ці фактори збільшують кількість інформації, яку можна отримати від внутрішньої структури досліджуваних об'єктів. Визначення зон, що містять краплі переохолодженої рідини, які створюють небезпеку виникнення обледеніння в досліджуваному районі простору по курсу польоту повітряного судна, пропонується виявляти за допомогою аналізу поляризаційних особливостей структури відбитих радіолокаційних сигналів.

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 представленої 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, підтверджені 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.

**АННОТАЦІЯ**

*Питерцев А.А.* Информационная технология выявления зон потенциального обледенения воздушных судов. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора филологии) по специальности 05.13.06 – информационные технологии. – Национальный авиационный университет.

**Содержание аннотации**

Диссертация посвящена созданию информационной технологии повышения безопасности полётов ПС на базе методов обнаружения потенциальных зон опасного обледенения. Основой представленных в работе результатов являются впервые разработанный *метод оценки информативных поляриметрических параметров зон потенциального обледенения*, усовершенствованный *метод обнаружения и классификации опасных метеорологических объектов с помощью бортовых информационных метеорологических систем*, в который была добавлена алгоритмическая последовательность реализаций для выявления потенциально опасных зон возможного обледенения, и *метод многокритериальной оценки степени опасности обледенения летательных аппаратов*.

Определение зон, содержащих капли переохлажденной жидкости, которые создают угрозу возникновения обледенения в исследуемой области пространства по курсу полета летательного аппарата, предложено осуществлять с помощью анализа поляризационных особенностей структуры отраженных радиолокационных сигналов.

Первый из представленных методов позволяет провести оценку основных параметров сигналов бортовой информационной метеорологической системы, полученных радиолокационным способом от исследуемой области пространства, заполненной гидрометеорами разных типов на основе представленной в работе математической модели отражения электромагнитных волн от гидрометеоров несферической формы благодаря аппроксимации несферической формы рассеивателей (гидрометеоров) сфероидами вращения и использованию модифицированных формул Релея.

Второй из представленных методов предлагает алгоритм обнаружения зон потенциального обледенения путем идентификации типов гидрометеоров на основе анализа разницы поляриметрических информативных параметров отраженного сигнала бортовой информационной метеорологической системы, принимая во внимание результаты математического моделирования и оценки этих параметров в первом из представленных в работе методов. Теоретические исследования, приведенные в работе, подтверждены экспериментальными данными.

Третий метод, описанный в данной диссертации, использует математический аппарат нечеткой логики для оценки степени опасности обледенения воздушного судна.

Также были проанализированы существующие методы обнаружения зон обледенения и предложены новые, более совершенные методы, позволяющие предупреждать об угрозе обледенения до его начала с учетом совокупности таких факторов, как поляриметрические параметры отраженного сигнала, температура, высота, скорость, продолжительность пребывания

в опасной зоне и др. Оценена достоверность этих методов и приведены рекомендации к их воплощению в существующих информационных системах обеспечения безопасности полётов.

**Ключевые слова:**

Информационные технологии, безопасность полетов, опасные метеорологические явления, обледенение, метеорологическая радиолокация, поляризметрический подход.

**ANNOTATION**

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 (172 - Telecommunications and radio engineering). - National Aviation University.

**Contents of the annotation**

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 be 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.