

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Кафедра військової підготовки

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЗАСТОСУВАННЯ МАЛИХ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА ЄВРОПЕЙСЬКІЙ ЧАСТИНІ ЄВРАЗІЙСЬКОГО КОНТИНЕНТУ

IMPACT OF METEOROLOGICAL PARAMETERS ON THE PERFORMANCE OF SMALL UNMANNED AERIAL VEHICLES ACROSS THE EUROPEAN PART OF THE EURASIAN CONTINENT

Виконав: здобувач денної форми навчання
спеціальності 103 Науки про Землю

Освітня програма Організація метеорологічного та геофізичного
забезпечення Збройних Сил України.....

Сливинський Богдан Валентинович

Керівник Попович П.П. _____
(підпис)

Рецензент к. геогр.н, доц., Жигайло О. Л.

Консультант к. геогр.н., доц., Грушевський О. М.

Рекомендовано до захисту:
протокол засідання кафедри
військової підготовки
№ ____ від ____ . ____ . 2025 р.

Захищено на засіданні ЕК № ____
протокол № __ від ____ . ____ . 2025 р.

Оцінка _____ / _____ / _____
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК

Начальник кафедри

_____ Олег ГРУШЕВСЬКИЙ
(підпис)

_____ Віталій ШЕЇН
(підпис)

Одеса 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Метеорологічні аспекти застосування БПЛА.....	6
1.1 Огляд безпілотних авіаційних технологій.....	6
1.2 Метеодрони.....	10
1.3 Вплив метеоумов на застосування дронів.....	11
2 Обмерзання БПЛА.....	14
2.1 Фізичні основи виникнення обледеніння дронів.....	14
2.2 Огляд досліджень, методів діагностики та боротьби з обмерзанням.....	16
3 Побудова та аналіз полів розподілу критичних значень від’ємних температур та потенційного обмерзання	20
3.1 Просторовий розподіл полів критичних значень температури повітря для застосування малих безпілотних літальних апаратів.....	20
3.2 Побудова та аналіз просторово розподілу полів потенційного обмерзання за десятирічний період для малих БПЛА.....	29
Висновки.....	32
Список використаних джерел.....	33
Додатки.....	36
Додаток А.....	37
Додаток Б.....	38

ВСТУП

З огляду на суттєве збільшення за останнє десятиріччя практичне використання різного типу безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у різноманітних сферах діяльності, виникає необхідність системного та різнобічного дослідження питань ефективного використання дронів з урахуванням останніх тенденцій розвитку дронівих технологій. Це підтверджує стрімкий розвиток галузей проектування та виробництва БПЛА, який обумовлений впровадженням новітніх технологій та одночасно виникненням та існуванням сучасних військових конфліктів. Використання БПЛА не обмежується застосуванням лише у військовій справі. Сучасні дрони людство використовує в різних сферах – починаючи від сільського господарства та екологічного моніторингу до логістики та в інших галузях. Їх впровадження відкриває нові можливості для виконання завдань з меншою витратою часу та коштів. В переліку різнобічних питань ефективного застосування дронів одне з ключових місць займає погодний фактор, який має такі складові: критичні параметри вітру; екстремальні, з точки зору експлуатації температури; окремі явища погоди (обмерзання, суттєве погіршення видимості, атмосферні опади та інше).

У цьому контексті є доцільним отримання та дослідження матеріалів з результатами аналізу кліматичних особливостей певних територій з урахуванням критеріїв щодо застосування деяких типів дронів.

В даній роботі проведено детальний аналіз просторово-часового розподілу полів критичної температури та вологості (обмерзання) стосовно дронів з роторними двигунами (RWUAV) для європейської частини Євразійського континенту.

Актуальність обраної тематики обумовлена тим, що бурхливий розвиток застосування малих БПЛА з роторними двигунами потребує всебічного вивчення аспектів їхнього застосування в деяких метеорологічних умовах

враховуючи кліматичні особливості певних регіонів. Таким чином здійснення аналізу різних територій, які мають визначений набір кліматичних характеристик, відповідно до ступені впливу на RWUAV, дозволяє з урахуванням економічного обґрунтування планувати виробництво, продаж та потенційне застосування певних класів дронів для територій, які розглядаються (включаючи існуючі та потенційно можливі театри військових дій).

Метою роботи є аналіз можливості використання дронів на визначеній території відповідно до критеріїв мінімальних експлуатаційних значень температур та потенційного обмерзання. Побудова та аналіз полів просторового розподілу можливостей використання поширеного типу дронів з роторними двигунами (RWUAV) з урахуванням їх експлуатаційних характеристик за метеорологічними критеріями та впливу потенційного обмерзання для європейської частини Євразійського континенту за результатами вивчення погодних умов за десятирічний період.

Завдання, що вирішувались у рамках дослідження для досягнення мети:

- вибір та обґрунтування критерію для оцінки ефективності застосування БПЛА;
- вибір даних об'єктивного аналізу NCEP/NCAR про мінімальну добову температуру за 2010 рік по обраній території;
- побудова та аналіз відповідних полів;
- вибір та обґрунтування критеріїв для дослідження потенційного обмерзання RWUAV;
- вибір вихідних даних реаналізу NCEP/DOE про температуру та відносну вологість повітря за період з грудня 2010 по лютий 2020 року;
- розробка алгоритму для обробки вихідних даних дослідження;
- отримання результатів та представлення їх у графічній формі (у вигляді полів);
- аналіз результатів та надання рекомендацій, щодо впровадження дронів по окремим територіям.

Кваліфікаційна робота викладена на 38 сторінках та складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі кваліфікаційної роботи розкриваються загальні відомості про дрони, а саме про історію виникнення, застосування в різних сферах, наведено класифікацію.

В другому розділі описані фізичні основи виникнення обледеніння на дронах, висвітлюються методики виявлення та боротьби з обледенінням.

В третьому розділі проведено аналіз полів просторового розподілу можливостей використання поширеного типу дронів (RWUAV) з урахуванням їх експлуатаційних характеристик за метеорологічними критеріями для Європейської частини Євразійського континенту за результатами вивчення погодних умов за десятирічний період.

У висновках наводяться результати проведених досліджень.

Список джерел, використаних при написанні роботи, складається з 25 позицій.

1 МЕТЕОРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА

1.1 Огляд безпілотних авіаційних технологій

Останнім часом дрони все частіше стають темою новинних публікацій. Наприкінці 2016 року компанія Amazon вперше здійснила доставку товарів за допомогою дрону, що стало важливим кроком у розвитку безпілотних технологій і змінило уявлення про процес отримання покупок. Однак далеко не завжди дрони опиняються в центрі уваги через позитивні події. Час від часу вони спричиняють інциденти – наприклад, аварії в знакових локаціях, або ж потрапляють у зони, де їх використання обмежене, зокрема аеропорти й стадіони. Стосовно України, питання використання дронів, найбільш актуально з точки зору впливу БПЛА на боєздатність збройних сил.

Популярність дронів серед споживачів зросла завдяки стрімкому технологічному прогресу. Проте самі безпілотники є результатом тривалого процесу розвитку та швидкого їх вдосконалення протягом останніх двох років в результаті бойових дій. Стосовно класифікації дронів відповідно до стандартів НАТО, в контексті даної роботи будуть розглядатись дрони першої категорії.

Історія дронів почалася ще в першій половині ХХ століття, в таких розвинених державах, як США коли їх використовували для навчальних цілей у збройних силах. На той час такі безпілотники мали низький рівень автономності, що відрізняло їх від сучасних аналогів. В Україні в галузі використання дронів спостерігаються революційні зміни, які впливають на всі етапи впровадження дронів починаючи з розробок та виробництва та закінчуючи підвищенням ефективності їх застосування та масової підготовки операторів.

В сучасному світі з розвитком науково-технічного прогресу еволюція дронів тривала десятиліттями, їх впровадження в цивільний ужиток відбулося

набагато швидше. Додатково цьому сприяв розвиток технологій відеозйомки, адже сучасні дрони зазвичай оснащені камерами високої роздільної здатності, що розширює їхні можливості застосування. В Україні ситуація склалася навпаки, розвиток військових БПЛА відбувався набагато швидше. Завдяки мініатюризації електронних систем, розробці легких міцних матеріалів та зростанню потужності обчислювальних пристроїв з'явилися модернізовані та більш функціональні моделі.

За короткий час у світі цивільний ринок дронів пережив справжній вибух популярності, але на даний час найбільше зростання відбувається саме у військовій сфері, де розвиток безпілотних технологій стався у відповідь на потреби збройних сил, що можна охарактеризувати як «попит стимулює інновації».

На відміну від періоду до 2022 року, коли ринок контролювали великі західні корпорації, за останні 2 роки у комерційному сегменті вдалося закріпитися новим компаніям. Яскравими прикладами успішних стартапів стали французька компанія Parrot і китайський виробник DJI. Parrot включила дрони у свою лінійку технологічних продуктів, тоді як DJI зробила ставку виключно на цей напрям, що дозволило компанії стати лідером ринку.

В Україні з'явилося багато невеликих компаній, які здійснюють модифікацію та виготовлення дронів, які являються не тільки конкурентоспроможними, але і є унікальними у своєму класі.

У країнах Європи та Америки стратегія цивільних виробників відрізняється від підходу військових. Їхня головна мета – зробити технологію доступною для масового споживача, що передбачає масштабне виробництво та комерціалізацію продуктів. На відміну від військового сектора, де виробники додатково заробляють на обслуговуванні, програмному забезпеченні та навчанні, у цивільному сегменті основний прибуток приносить продаж готових пристроїв.

Завдяки своїй універсальній технології, дрони знаходять застосування у різних галузях і сферах промисловості. В Україні в даний час вони

використовуються переважно у військовій сфері, але з часом їхній потенціал значно розшириться і буде охоплювати широкий спектр цивільних завдань, що впливають на економіку.

Через різноманіття конструкцій та функціональних можливостей безпілотні літальні апарати класифікують за декількома параметрами, а саме:

- тип конструкції: ця категорія включає безпілотні літальні апарати з фіксованим крилом, гвинтокрилі, гібридні, махові та інші типи, які відрізняються своїм механізмом польоту;

- призначення: БПЛА можна класифікувати залежно від їхньої задачі, такого як розвідка, спостереження, атака, транспортування, пошуково-рятувальні дії тощо;

- вага: БПЛА можна класифікувати за їхньою вагою, наприклад, як мікро БПЛА, малі БПЛА, тактичні БПЛА, БПЛА середньої висоти з великою тривалістю польоту (MALE), БПЛА великої висоти з великою тривалістю польоту (HALE) тощо;

- джерело живлення: БПЛА можуть живитися від електрики, палива, сонячної енергії або інших джерел;

- управління: БПЛА можуть бути дистанційно керованими, автономними, напіваавтономними або мати інші типи управління;

- висота польоту: БПЛА можна класифікувати за їх діапазоном висот, наприклад, як низьковисотні БПЛА, високовисотні БПЛА та стратосферні БПЛА;

- тип аеродинамічного компонування: БПЛА можуть мати різні конфігурації, такі як монороторні, багатороторні, з похилим ротором, з похилим крилом та інші;

- спеціалізація: БПЛА можуть мати різне призначення, таке як військове, цивільне, комерційне, промислове, наукове тощо;

- спосіб запуску: БПЛА можуть запускатися з землі, повітря, моря або використовувати інші типи методів запуску;

- корисне навантаження: БПЛА можуть перевозити різне корисне навантаження, таке як датчики, камери, системи зв'язку, зброю, вантажі тощо;
- рівень автономності: БПЛА можуть мати різні рівні автономності, такі як повністю автономний, напівавтономний, керований людиною та інші;
- розмір: БПЛА можуть мати різні розміри, такі як міні – БПЛА, портативні БПЛА, переносні БПЛА, БПЛА, що встановлюються на транспортних засобах, тощо;
- дальність польоту: БПЛА мають різні радіуси польоту, тому вони поділяються на такі як БПЛА малої дальності, БПЛА середньої дальності, БПЛА великої дальності тощо. [2]

Дрони відіграють ключову роль у пошуково – рятувальних операціях, забезпечуючи оперативний збір даних у критичних ситуаціях. Оснащені високоточними камерами та тепловізорами, вони дозволяють швидко знаходити зниклих людей та оцінювати масштаби руйнувань. Крім того, дрони можуть доставляти медичні засоби та рятувальне обладнання у важкодоступні місця, що значно підвищує ефективність допомоги та рятує життя.

Безпілотні літальні апарати використовуються для виявлення вогнищ займання, що допомагає пожежникам оцінити масштаби загоряння та вибрати оптимальну стратегію гасіння. Деякі моделі оснащені системами розпилення води або вогнегасних речовин, що дає змогу боротися з вогнем у місцях, недоступних або небезпечних для наземних команд.

В Китаї безпілотна доставка набуває популярності у сфері логістики, змінюючи традиційний підхід до отримання покупок. Логістичні та електронні комерційні компанії активно впроваджують дрони для скорочення часу доставки та зниження витрат. Завдяки цьому покупки можуть прибувати до споживачів менш ніж за 30 хвилин, що робить процес швидшим та зручнішим.

У будівництві та інженерії дрони значно спрощують контроль за проектами. Високоточні камери дозволяють проводити інспекцію мостів, будівель та інших споруд, покращуючи оцінку їхньої структурної цілісності.

Використання LiDAR - сенсорів дає змогу створювати 3D - моделі місцевості, що допомагає у плануванні та технічному обслуговуванні інфраструктури.

У сфері точного землеробства дрони використовуються для моніторингу стану посівів. Оснащені мультиспектральними сенсорами, вони аналізують рослинність, виявляючи проблеми з вологістю, дефіцит поживних речовин або хвороби. Отримані дані допомагають фермерам ефективніше застосовувати добрива та засоби захисту рослин. Крім того, дрони використовуються для висіву насіння, підвищуючи врожайність та автоматизуючи польові роботи.

Дрони активно застосовуються у геологічних дослідженнях, зокрема для створення точних карт місцевості завдяки високоякісним знімкам. Вони допомагають збирати зразки гірських порід та інших матеріалів для подальшого аналізу. Крім того, їх використовують для моніторингу зсувів і вивчення вулканів, отримуючи унікальні дані про газові викиди та попіл у важкодоступних районах.

1.2 Метеодрони

Метеодрон – це спеціалізований безпілотник, оснащений метеорологічними приладами для вимірювання температури, відносної вологості, параметрів вітру, атмосферного тиску та інших спеціалізованих параметрів. На відміну від звичайних дронів, метеодрони здатні працювати у складних погодних умовах завдяки системам обігріву пропелерів і аварійним парашутам для безпечного приземлення. Вони можуть дистанційно стартувати і досягати висоти до 6000 метрів, збираючи дані під час підйому та спуску.

Дрони з обертовими гвинтами мають перевагу вертикального зльоту й посадки, що дозволяє ефективно профілювати приземний шар атмосфери. Водночас точність вимірювань залежить від правильного розміщення і вентиляції датчиків, оскільки недосконала вентиляція або вплив сонячного випромінювання можуть спричинити похибки, особливо під час вимірювання температури повітря. Складність також виникає при оцінюванні швидкості

вітру, адже дрон постійно змінює нахил для компенсації поривів. Відповідно, дані про горизонтальну швидкість вітру розраховуються на основі інформації з інерційного вимірювального блоку і GPS-навігації.

Метеодрони істотно покращують якість збору, отримані ними дані дозволяють докладніше аналізувати просторово–часові особливості полів метеоелементів в тому числі і температурних полів. Ці дрони – майбутнє радіозондів. Кожен БПЛА працює як мобільна метеостанція, яка має ряд суттєвих переваг, а саме гнучкість у зборі даних – це здатність вирушати у віддалені місця, де відсутні традиційні метеостанції. Також дрони являються економічно вигідним рішенням для збору даних, оскільки їх можна розгортати в будь – якому місці і робити це повторно необхідною кількістю разів. В деяких країнах метеодрони вже інтегрують в сучасне життя. наприклад Норвегія реалізує багатомільйонний проєкт у співпраці з Норвезьким дослідницьким центром (NORCE). [3] Через складні погодні умови виявилися недоліки прогностичних моделей, які зумовлені недостатньою кількістю спостережень в граничному шарі атмосфери. Метою проєкту є встановлення 30 метеотронів та метеобаз по всій країні. Для підвищення точності у прогнозуванні торнадо в штаті Оклахома, США були задіяні метеодрони, які здійснили понад 100 дослідницьких польотів. Ці польоти зібрали важливу інформацію в приземному, яка потім була інтегрована в модель і дозволила в подальшому Національному управлінню океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) покращити прогнози торнадо.

1.3 Вплив метеоумов на застосування дронів

На відміну від традиційних літаків, дрони, які ми розглядаємо, працюють на малих висотах і значно більше залежать від метеорологічних умов в приземному шарі до 1 км. Тому інформація про деякі метеорологічні параметри в цьому шарі є ключовою для операторів, адже вона допомагає

планувати польоти та забезпечувати безпеку як самого дрона, так і навколишнього середовища.

Специфічна погода для дронів (Drone – specific weather) – це метеорологічні дані, адаптовані спеціально для потреб операторів безпілотників. Вона охоплює не лише загальні прогнози та спостереження, а й параметри, що мають критичне значення для дронів. [4] Зокрема, це швидкість і напрямок вітру на різних висотах, хмарність, температурні коливання та рівень вологості.

Дрони, як і всі літальні апарати, значною мірою піддаються впливу вітру. Те, наскільки вітер впливає на дрон у повітрі, залежить від його типу, розміру та ваги. Малі та легкі дрони більш вразливі до вітру, ніж великі. Вплив вітру на керування дронами відрізняється для багатороторних моделей і вертольотів у порівнянні з безпілотниками з фіксованим крилом. Коли дрон зависає в повітрі відносно землі, вітер створює додаткову повітряну швидкість, і для утримання позиції необхідні коригувальні команди, що може збільшувати навантаження на двигуни та витрати заряду батареї. [5] При сильному вітрі дрон може втрачати стабільність і зміщуватися. Безпілотники з фіксованим крилом літають відносно повітряного потоку, тому їхня швидкість відносно землі змінюється залежно від сили та напрямку вітру.

Виробники комерційних дронів визначають максимальну допустиму силу вітру для польотів. Пілот повинен уважно вивчити інструкції та дотримуватися рекомендацій, щоб виконати безпечний політ. Якщо вітер занадто сильний, дрон може знести з курсу, або навіть ускладнити керування ним.

Більшість дронів не мають захисту за стандартом IP, який визначає стійкість електронних пристроїв до впливу пилу та вологи. [6] Через це дрони особливо вразливі до дощу, густого туману та снігу. Волога може проникати всередину корпусу й пошкоджувати елементи керування, а наслідки такого впливу можуть проявитися не одразу, а з часом у вигляді збоїв у роботі.

Від'ємні температури можуть призводити до обмерзання, тобто утворення льоду на пропелерах або крилах, що суттєво впливає на керуваність

дрона та навіть може призвести до його падіння. Для мультикоптерів це може означати втрату тяги, необхідної для утримання в повітрі, а у дронів із фіксованим крилом порушення потоку повітря навколо крил може призвести до втрати стійкості в польоті та навіть до втрати самого дрону. Про це свідчать численні публікації в мережі “Internet” від досвідчених користувачів дронів про випадки обмерзання БПЛА.

Також від’ємні температури роблять пластикові елементи корпусу більш крихкими, підвищуючи ризик механічних пошкоджень, тому дрон у мороз потрібно транспортувати й обслуговувати з особливою обережністю.

Летючість літальних апаратів змінюється залежно від щільності повітря, яка, у свою чергу, залежить від висоти, атмосферного тиску та температури. У керівництві з експлуатації вказано максимальну висоту польоту, для певного типу БПЛА обмежується його технічними характеристиками.

2 ОБМЕРЗАННЯ БПЛА

2.1 Фізичні основи виникнення обледеніння дронів

“Обмерзання – це процес накопичення льоду на обтічних частинах літальних апаратів, зовнішніх деталях спеціального обладнання під час польоту у хмарах, тумані, дощі. Необхідними умовами обмерзання є:

- наявність у повітрі на висоті польоту переохолоджених крапель води;
- від’ємна температура поверхні літаючого апарату.” [1]

Обмерзання безпілотних літальних апаратів є серйозною проблемою, оскільки воно призводить до проблем з керуванням та подальшої втрати дрону.

Коли літальний апарат потрапляє в умови обледеніння, то впливу піддаються такі критично важливі елементи, як ротори та пропелери, сенсори польоту (переважно датчик повітряної швидкості), аеродинамічні поверхні (крила, оперення, повітрозабірники двигунів або системи охолодження).

Дослідження в даній роботі зосереджено на використанні дронів з роторними двигунами (RWUAV), що вносить деякі особливості в питання обмерзання. Ротори створюють підйомну силу та тягу, завдяки яким літальний апарат утримується в повітрі та маневрує, однак вони можуть дуже швидко накопичувати значну кількість льоду. Дослідження показали, що лопаті ротора можуть втрачати до 80% підйомної сили та зазнавати збільшення крутного моменту більш ніж на 200% уже через 2 хвилини після потрапляння в умови обледеніння. [7] Лід також збільшує опір лопатей і обмежує максимальну швидкість обертання двигуна. Крім того великі відцентрові сили, що діють на лід, який утворився на лопатях, можуть призводити до відколнування фрагментів льоду. Це викликає дисбаланс у роботі ротора і сильні вібрації, що можуть пошкодити двигун.

За даними іншого дослідження (SAE), гвинти БПЛА накопичують лід швидше, ніж крила, і можуть втрачати до 70% підйомної сили вже за кілька

хвилин польоту в умовах обмерзання. [8] За оцінками НАСА, типовий рівень втрат аеродинамічної ефективності становить близько 10%, а в рідкісних випадках може досягати 15-20% через незбалансованість і нерівномірний розподіл льоду на поверхнях. [9] Обмерзання також різко підвищує енергоспоживання: двигуни мусять працювати з більшою тягою, щоб утримати дрон у повітрі, що зменшує час польоту.

Щодо впливу низьких температур, то вони сповільнюють хімічні реакції в літій-полімерних акумуляторах, знижуючи їхню ємність і збільшуючи внутрішній опір, що може скоротити час польоту на 20-30% і навіть активувати механізми саморозряду у системах безпеки акумулятора. [10]

Лід може накопичуватися на відкритих поверхнях БПЛА, включаючи крила, пропелери, кронштейн і навіть корисне навантаження, таке як камери. Згідно з дослідженням Gramrosch та ін., в якому вивчалось зіткнення крапель води на октокоптері, передня частина лопаті гвинта має найбільшу вразливість до накопичення льоду і через сумісний вплив відцентрової сили та сили зсуву лід, що утворюється на лопатях має нерівну форму. [11] Відцентрова сила ускладнює утворення льоду на гвинтокрилах БПЛА порівняно з БПЛА з нерухомим крилом. Ефект більш виражений за тепліших температур через частку води, яка залишається незамерзлою. Ці краплі води переносяться дією відцентрової сили та утворюють складні крижані структури, які можуть збільшити шорсткість поверхні та викликати відрив потоку та дисбаланс маси, тим самим збільшуючи опір та вібрації. Таким чином, лід суттєво впливає на аеродинамічні характеристики БПЛА.

Усе це свідчить про важливість питання впливу фактору екстремально низьких температур та обмерзання на застосування RWUAV. Також актуальна необхідність інтеграції систем раннього виявлення обмерзання та автоматичної регуляції нагріву або активації покриттів у сучасних дронах, особливо для експлуатації в зимових умовах в окремих районах, де часті температурні коливання і висока вологість можуть швидко створювати небезпечні умови для безпеки та стабільності польоту.

2.2 Огляд досліджень, методів діагностики та боротьби з обмерзання дронів

З урахуванням розглянутого вище необхідно приділити особливу увагу на розробку методів виявлення обмерзання. У контексті застосування малих БПЛА, наприклад метеодрон Aerosonde, важливо використовувати прості та ефективні методики, які не потребують складного обладнання.

Щодо аналізу обмерзання, то алгоритм RAID (Robotic Aircraft Icing Detection), розроблений під час операцій за участю метеодрону Aerosonde, базується лише на спостереженнях за значеннями температури та відносної вологості повітря. [12] Сучасна модель RAID включає декілька температурних і вологісних порогів, які використовуються в різних інших мезомасштабних схемах обмерзання T-RH, які описані Thompson та ін. [13] Існує декілька схем RAID для виявлення обледеніння за допомогою значень температури та відносної вологості. В схемі RAID першої категорії розглядаються області з температурою від 4 до -40°C і відотною вологістю понад 63%. Верхній поріг температури взятий з експериментів в аеродинамічній трубі, де лід накопичувався на об'єкті при $+4^{\circ}\text{C}$. Нижній поріг в -40°C , нижче якого вода миттєво замерзає. Значення відносної вологості 63% взято з моделі RAP (Rapid Refresh) – це чисельна метеорологічна модель для короткострокового прогнозування погоди. [14] Щоб зменшити переоцінку обледеніння, обчислюється похідна другого порядку для температури і вологості ($T'' \geq 0$, $RH'' \leq 0$). Якщо виконуються ці умови – можливе обледеніння.

В схемі RAID другої категорії температурний діапазон менший і складає від 0 до -30°C , відносна вологість сягає більше 75%. Ці значення базуються на дослідженні польотів у зонах обледеніння, які були проведені в статті Sand W. та ін. [15] Як і в першій категорії були взяті похідні другого порядку, де $T'' \geq 0$ та $RH'' \leq 0$. Ця категорія дає змогу виявити помірне чи сильне обмерзання на висотах в 900 м від рівня землі.

Третя категорія також використовує похідні другого порядку, але при температурах від $+1$ до -20°C і $\text{RH} > 80\%$. Згідно з експериментами NASA, які описуються в книзі Lankford T. T. [16], при температурі $+1^{\circ}\text{C}$ утворюється м'який лід, а при температурі нижче -1°C він твердіє. При температурах, які вище за -20°C можливе сильне обледеніння. Ця категорія найбільш небезпечна, оскільки швидкість накопичення льоду може перевищувати 2 см за хвилину.

Для боротьби з обмерзанням існують різні методи, які поділяються на дві основні групи: активні та пасивні методи. Пневматичний метод видалення льоду базується на використанні гумових камер, які вбудовані в передній край крила або стабілізатора. [16] Для його потрібне джерело повітря високого тиску, завдяки якому відбувається розширення гумових камер та в подальшому руйнування шару льоду (рис. 2.1). Недоліком цього методу є її розміри та вага, тому вона використовується лише на літаках.



Рисунок 2.1 – Пневматичний метод боротьби з обмерзанням

Метод протиобледеніння гарячим повітрям базується на обігріві поверхонь літаючого апарату, які схильні до обмерзання, а саме крила, лопаті тощо. Нагрівання здійснюється завдяки відводу гарячого повітря з двигунів по повітропроводам, які проходять під поверхнею крил та стабілізаторів. Цей

метод боротьби з обледенінням добре зарекомендував себе на вимагає великі енерговитрати, також тепло може негативно впливати на деякі матеріали з яких зроблені БПЛА.

Електрична система проти обмерзання або усунення обледеніння використовує електричні нагрівальні елементи, які нагрівають обшивку чи окремий компонент досягаючи при цьому необхідного результату (рис. 2.2). В цій системі існує два режими – це протиобледеніння та усунення обледеніння. Перший, в свою чергу, постійно нагріває поверхню для запобігання утворення льоду і використовується на компонентах на яких утворення льоду недопустиме.

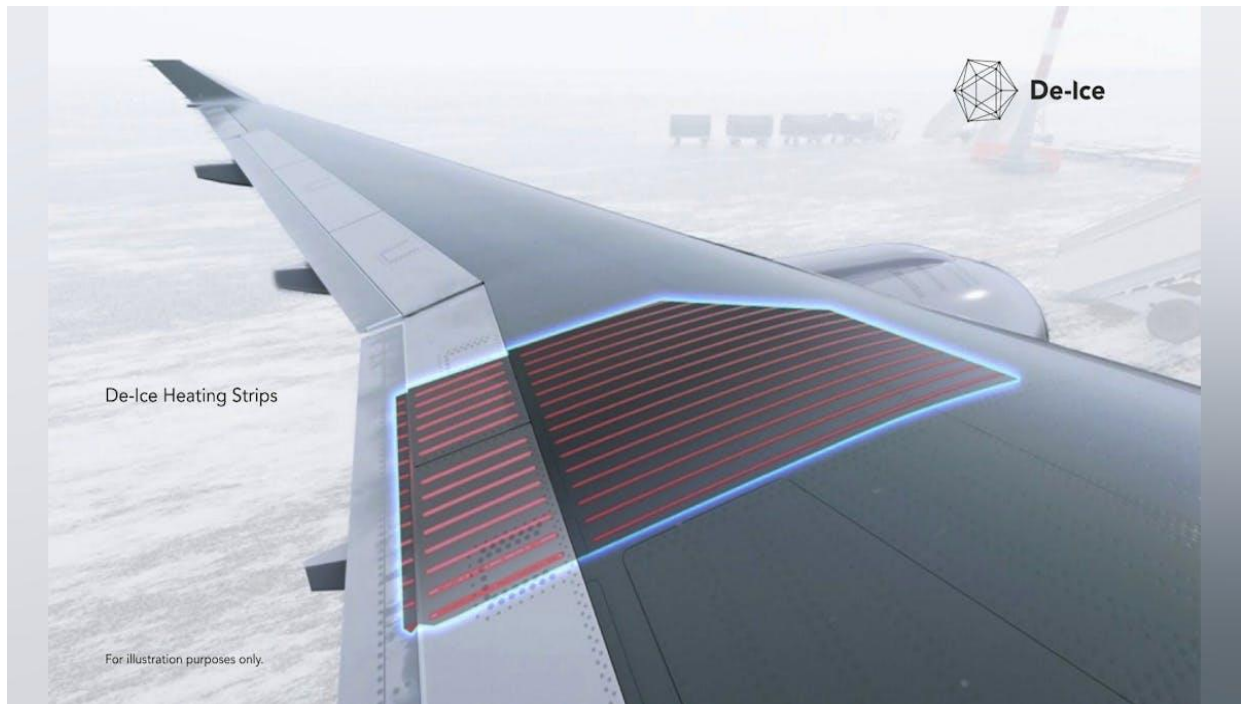


Рисунок 2.2 – Електрична система проти обмерзання або усунення обледеніння

До пасивних методів боротьби з обмерзанням можна віднести покриття поверхні літака рідкими речовинами, які зменшують адгезію льоду або знижують точку замерзання води на поверхні. Зазвичай їх наносять на поверхню літального апарату на землі, але деякі БПЛА мають спеціальні

розпилювачі для нанесення рідини під час польоту, наприклад дрон RQ-1B. Цей метод має обмежений час використання і для його використання необхідний бак великої ємності, тому він є не занадто ефективний.

3 ПОБУДОВА ТА АНАЛІЗ ПОЛІВ РОЗПОДІЛУ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ВІД'ЄМНИХ ТЕМПЕРАТУР ТА ПОТЕНЦІЙНОГО ОБМЕРЗАННЯ

3.1 Просторовий розподіл полів критичних значень температури повітря для застосування малих безпілотних літальних апаратів

Враховуючи вищесказані положення про широкий спектр використання дронів у цивільній і військовій сферах доцільно ставити питання дослідження ефективності застосування певних типів дронів по певним територіям. Ця ефективність залежить від комплексу факторів, який включає, як суб'єктивні (людські фактори), так і об'єктивні складові до яких можна віднести тактико-технічні характеристики дронів. Більшість технічних можливостей дронів напряду або опосередковано залежить від метеорологічних умов їх експлуатації. З цієї точки зору цікаво дослідити розподіл ефективності застосування БПЛА за критерієм екстремальних температур та потенційного обмерзання. В контексті запланованої теми з точки зору майбутнього дослідження впливу на дрони обмерзання, в даній роботі було доцільно обмежитися дослідженнями екстремальних низьких температур. При цьому враховувались кліматичні особливості регіону по якому проводяться дослідження – незначний вплив екстремальних високих температур на дієвість дронів в теплий період року. В якості території для дослідження була обрана Європейська частина Євразійського континенту, оскільки ця територія цікава з точки зору аспектів впровадження та вдосконалення існуючих дронівих програм в різних галузях економіки та у військові справи. Також результати цього дослідження можуть бути цікаві, як елементи щодо маркетингу регіонального ринку спеціальних та побутових дронів для території, яка досліджується в роботі.

Для дослідження полів розподілу критичних значень від'ємної температури повітря, які впливають на експлуатацію дронів, порівнювались погодні дані за 2010 із допустимими умовами, що зазначені виробниками для експлуатації дронів. Для зручності дослідження, дрони були поділені на два класи (на основі списку комерційних реєстрацій Федерального управління цивільної авіації США (FAA)). [17] Клас звичайних дронів (CD – Common Drone) на основі середніх погодних характеристик 50 найпоширеніших зареєстрованих дронів. CD має робочу температуру від 0 до +40°C, максимальну стійкість до вітру 10 м/с і не підходить для польотів під дощем (порогове значення опадів 0 мм/год). Ці характеристики відповідають 52% активних комерційних реєстрацій у списку FAA. Також було визначено клас дронів, які є стійкі до жорсткіших погодних умов (WRD – Weather-Resistant Drone) на основі другого за поширеністю малого дрона для доставки, який є єдиним із цієї категорії, для якого виробник надав дані щодо допустимих значень метеорологічних величин. WRD має робочу температуру від -20 до +46°C, деяку стійкість до вітру, що дозволяє здійснювати польоту при швидкості вітру до 14 м/с і здатність працювати під опадами до 50 мм/год.

В якості вихідних даних було використано інформацію Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA) про мінімальну добову температуру за 2010 рік для Європейської території Євразійського континенту з банку кліматичних даних (NOAA NCEP/NCAR). Для роботи було взято дані за 3 періоди року, а саме зимовий період (грудень-січень-лютий), весняний (березень-квітень-травень), осінній (вересень-жовтень-листопад). Були обрані дні з температурою, яка входить в наступні градації, а саме від -20 до +46°C для WRD та від 0 до +40°C для CD, і визначений відсоток від загальної кількості днів в кожному періоді.

Ефективність використання дронів – це відсоток днів з температурними умовами в яких виробник рекомендує застосовувати дрони без значної шкоди для них.

Після візуалізації результатів аналізу матеріалу можна зробити певні висновки. Можна зазначити, що взимку незначна частина території Європи придатна для використання дронів CD класу через переважання від'ємних температур (рис. 3.1).

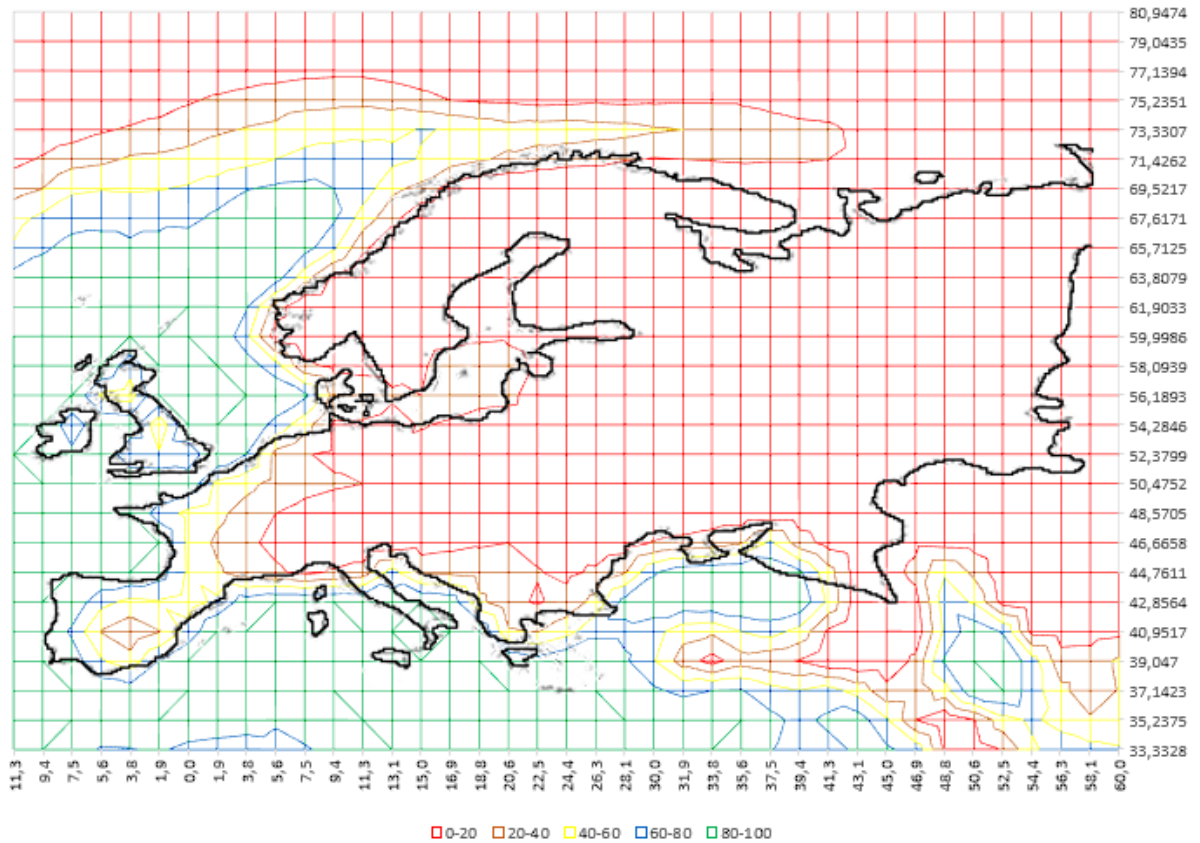


Рисунок 3.1 – Поле розподілу ефективності використання дронів класу CD (звичайних дронів) для зими

Над Західною Європою, а саме над Італією, Іспанією, Францією та над Британськими островами ситуація склалася інша, над цими територіями для зимового періоду не характерні від'ємні температури, тому і ефективність використання дронів більша ніж 0-20%. Розподіл ефективності використання дронів для зими достатньо показово узгоджується з відомими кліматичними особливостями територій, які розглядаються. Так чітко прослідковується вплив теплої течії Гольфстрім на узбережжя Північної Європи. Також можна

виділити факт впливу акваторій морських басейнів на прилеглі території у зимовий період, коли море відіграє роль акумулятора тепла для навколишнього простору. Особливо можна відмітити вплив орографії на предмет досліджу: прослідковується погіршення умов застосування дронів у гірських районах Балкан, Іспанії та Туреччини. Загалом в зимовий період на більшій частині обраної території, а саме на Європейській території Євразійського континенту не рекомендується цілодобове використання дронів класу CD.

У зимовий період можна зазначити що висока ефективність використання дронів класу WRD характерна для більшості території Європи (більше 60% ефективності) (рис. 3,2).

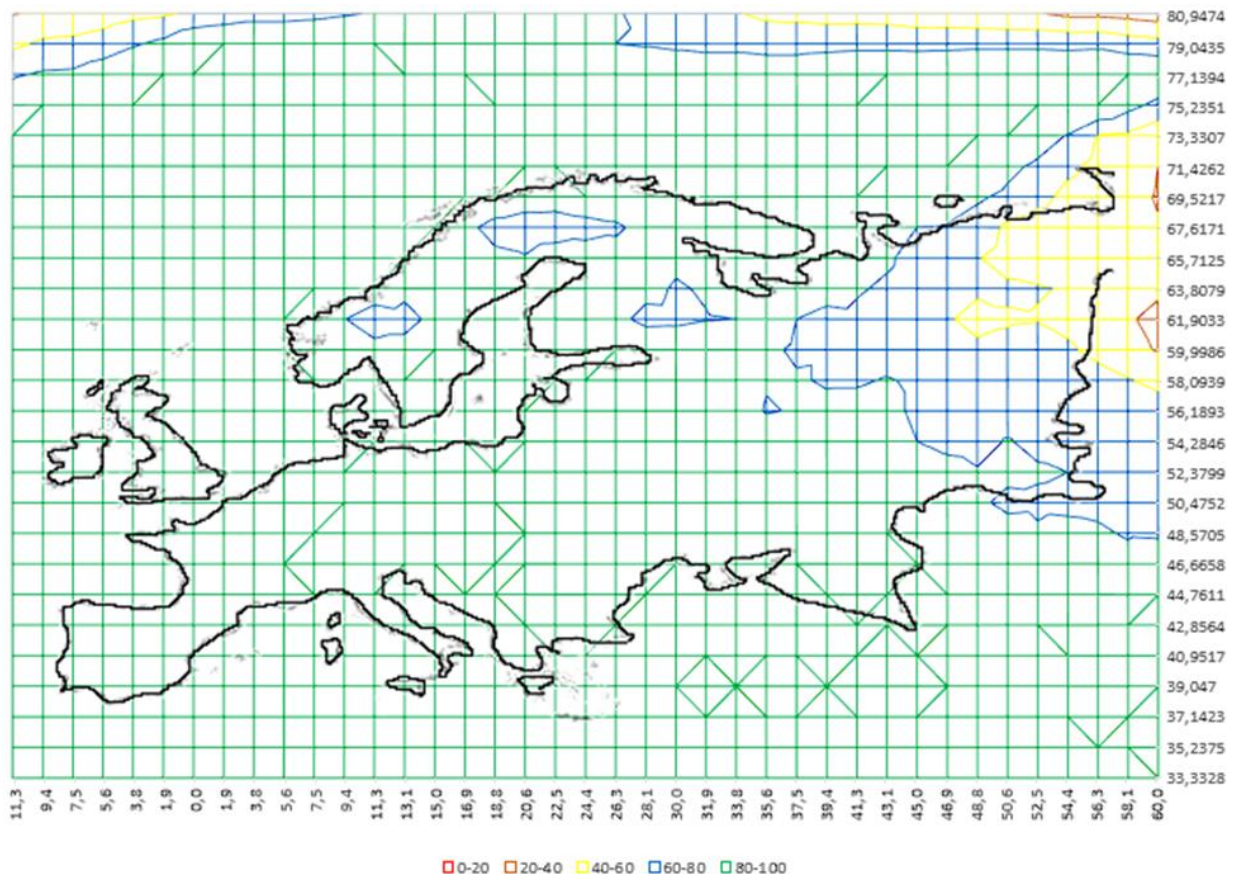


Рисунок 3.2 – Поле розподілу критичних значень температури повітря за зимовий період для дронів класу WRD (стійких до погодних умов) за 2010 рік

Якщо не враховувати фактор течії Гольфстрім, то прослідковується чітке погіршення умов застосування даного типу дронів (зниження їх ефективності) у напрямку збільшення широти місцевості починаючи з 60° П. Ш. Особливо це прослідковується для районів Росії з вираженими континентальними кліматичними особливостями. Окремі гірські райони (Альпи, Скандинавія та Урал) демонструють знижену ефективність використання (поступове зниження до осередків з нульовими значеннями).

На рис. 3.3 зображено поле розподілу критичних значень температури повітря за весняний період для звичайних дронів за 2010 рік, можна зазначити що висока ефективність використання дронів характерна для більшості території Європи (більше 60 відсотків ефективності).

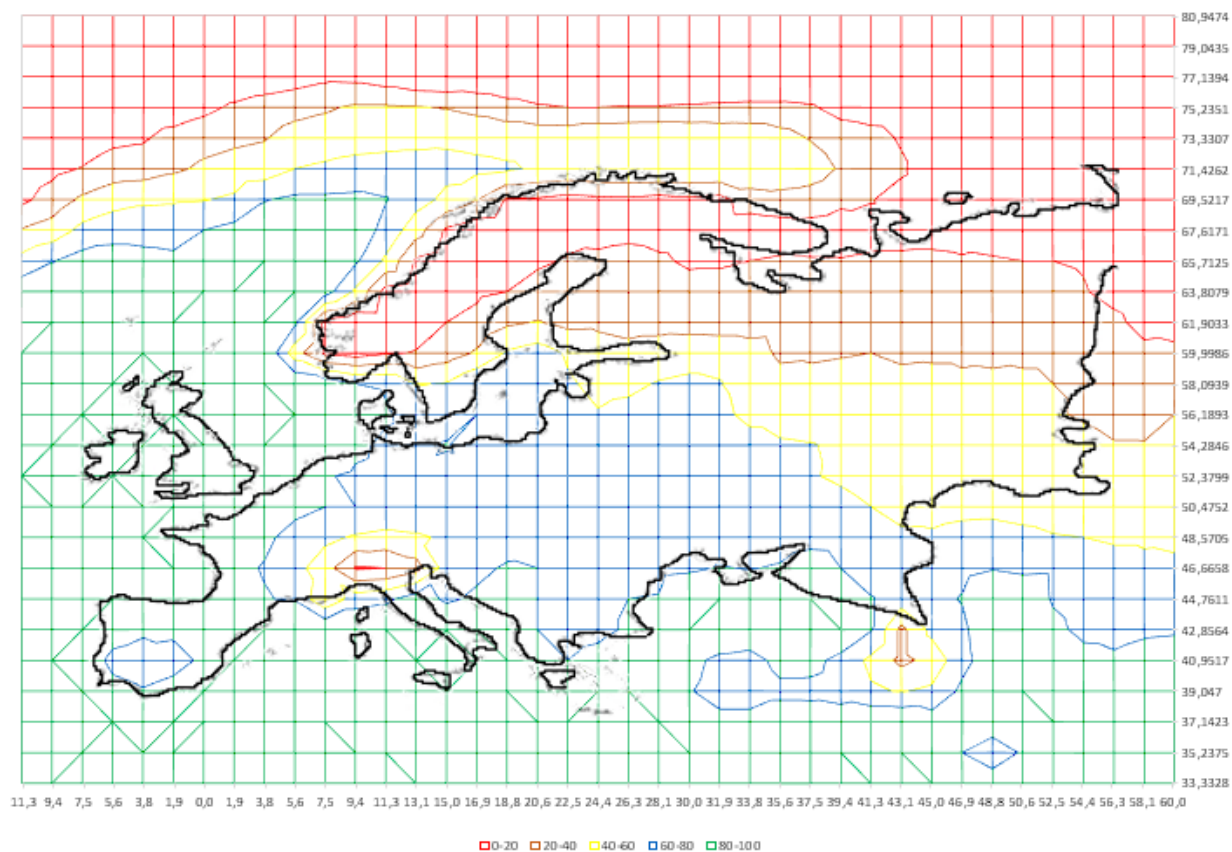


Рисунок 3.3 – Поле розподілу критичних значень температури повітря за весняний період для дронів класу CD (звичайних дронів) за 2010 рік

Якщо не враховувати фактор течії Гольфстрім, то прослідковується чітке погіршення умов застосування даного типу дронів (зниження їх ефективності) у напрямку збільшення широти місцевості починаючи з 60° П. Ш. Особливо це прослідковується для районів Росії з вираженими континентальними кліматичними особливостями. Окремі гірські райони (Альпи, Скандинавія та Урал) демонструють знижену ефективність використання (поступове зниження до осередків з нульовими значеннями).

На рис. 3.4 зображено поле розподілу критичних значень температури повітря за весняний період для дронів стійких до погодних умов за 2010 рік, можна зробити висновок, що вони виправдовують свою назву, оскільки ефективність використання по обраній території має більш високі та стійкі показники.

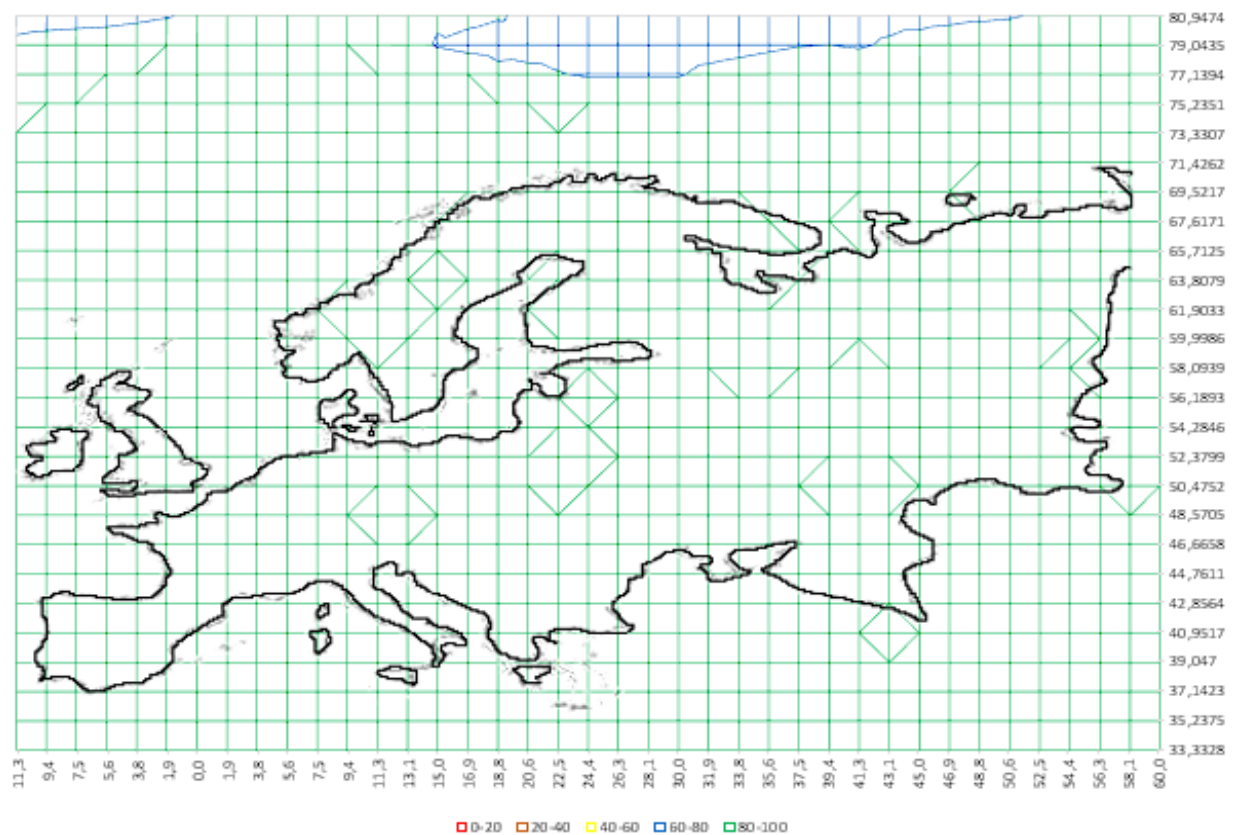


Рисунок 3.4 – Поле розподілу критичних значень температури повітря за весняний період для дронів класу WRD (стійких до погодних умов) за 2010 рік

Доцільно відмітити, що для весняного періоду не існує обмеження використання дронів такого типу.

На рис. 3.5 зображено поле розподілу критичних значень температури повітря за осінній період для звичайних дронів за 2010 рік.

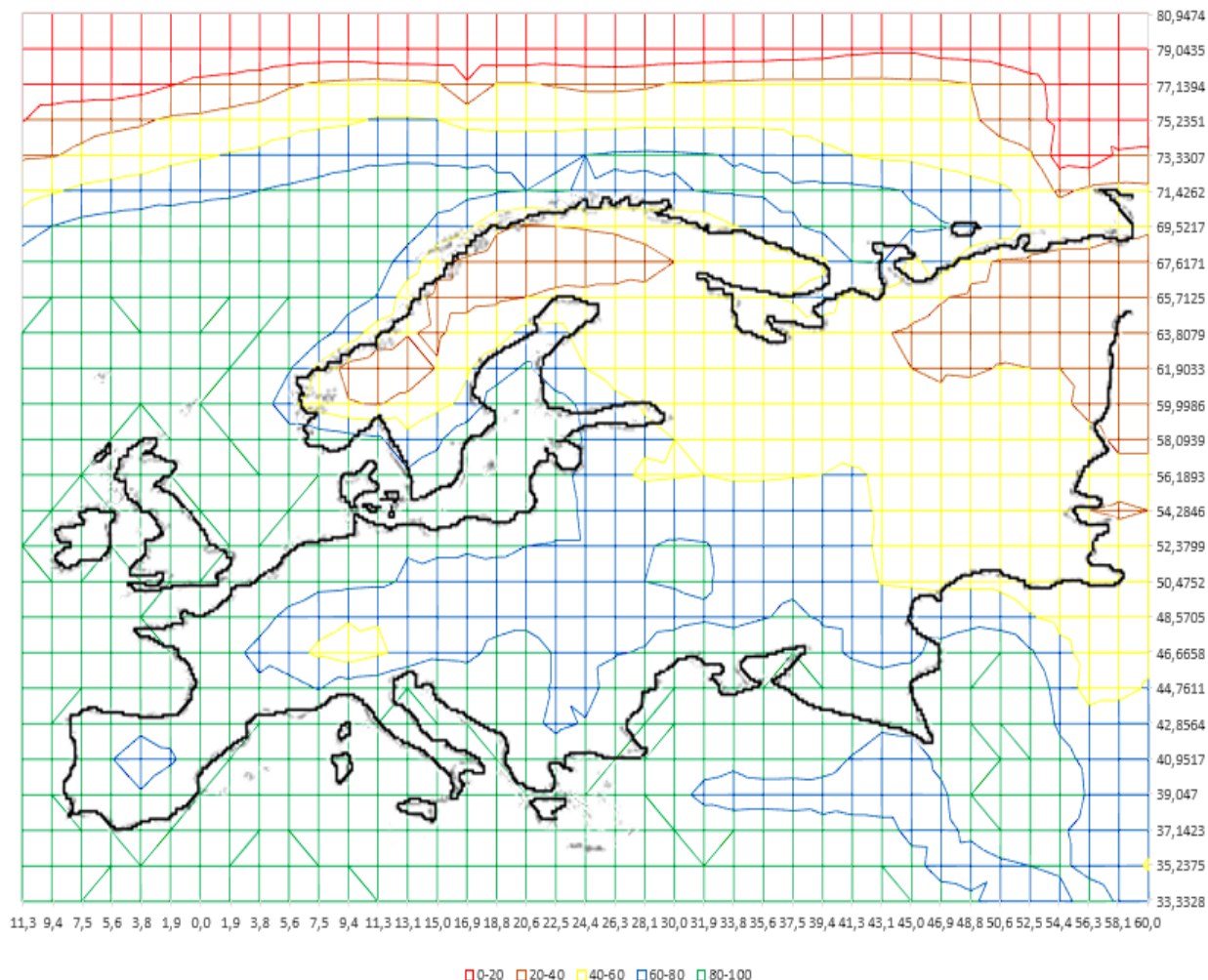


Рисунок 3.5 – Поле розподілу критичних значень температури повітря за осінній період для дронів класу CD (звичайних дронів) за 2010 рік

Можна зазначити, що ситуація схожа з весняним періодом, але є одна відмінність – вплив водної поверхні, а саме те, що за рахунок позитивного теплового балансу в системі море-суша можна побачити що приблизно 100 км суходолу починаючи від берегової лінії має підвищену на 20% ефективність використання дронів порівняно з континентальною частиною.

Проведений аналіз для дронів класу WRD для осіннього періоду (рис. 3.6) вказує на практично необмежений характер їх застосування на цій території, а ефективність цілодобового використання становить 80% і більше.

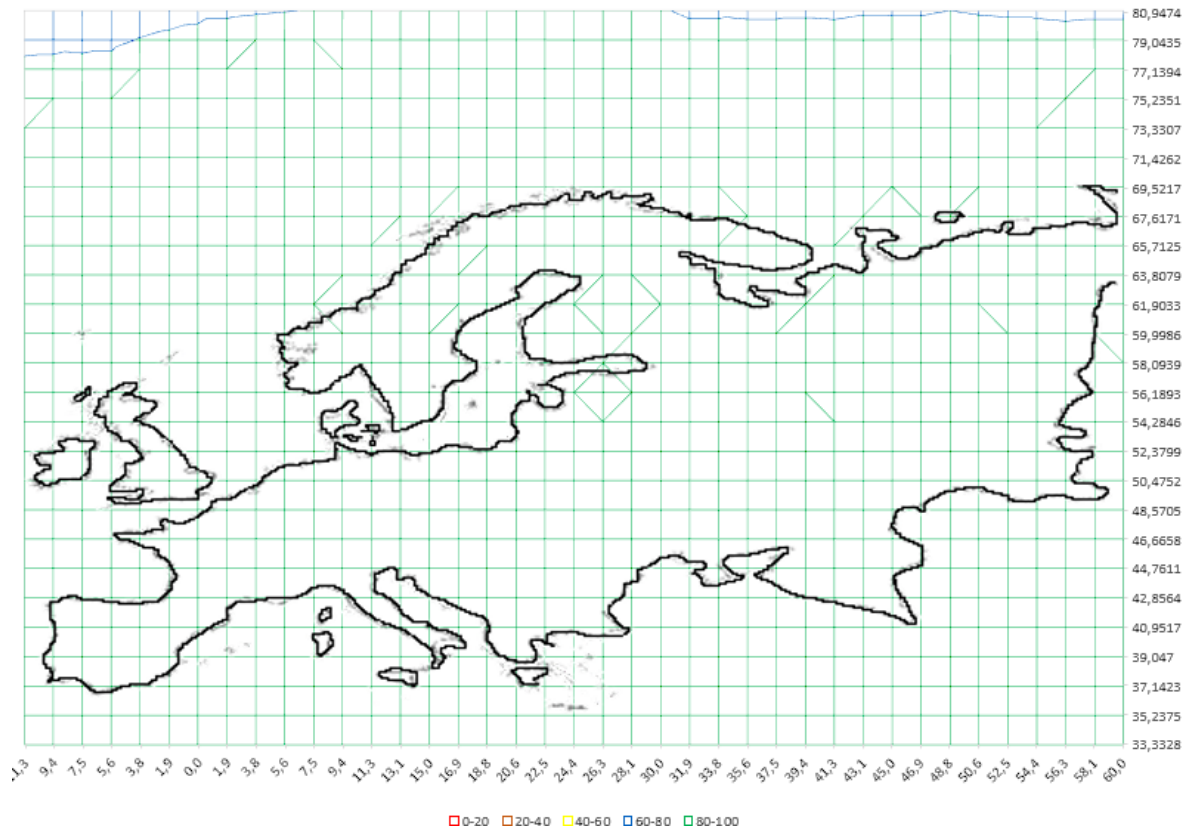


Рисунок 3.6 – Поле розподілу критичних значень температури повітря за осінній період для дронів стійких до погодних умов за 2010 рік

Проведене дослідження просторового розподілу критичних значень температури повітря за зимовий, весняний та осінній періоди 2010 року для двох класів дронів (звичайних – CD та стійких до погодних умов – WRD) показав суттєві відмінності у можливостях їх експлуатації в межах Європейської території Євразійського континенту.

Для звичайних дронів (CD) використання було суттєво обмежене в зимовий період через поширення від’ємних температур: ефективність застосування в основному не перевищувала 0-20%, за винятком окремих регіонів Південної Європи. У весняний та осінній періоди умови для

використання дронів CD суттєво поліпшувалися, з ефективністю понад 60% на більшості рівнинних територій, однак гірські райони залишалися проблемними зонами через локальні температурні контрасти. Дрони, стійкі до жорсткіших погодних умов (WRD), демонстрували значно кращі результати в усі сезони. Їхня ефективність у зимовий період складала понад 60% на рівнинних територіях і 40-60% у гірських регіонах. У весняний та осінній періоди WRD практично не мали обмежень для експлуатації, показуючи ефективність понад 60% на всій досліджуваній території.

Отже, стійкі до погодних умов дрони мають значні переваги у використанні в різноманітних кліматичних умовах і можуть весь спектр завдань в цивільних та військовій галузях протягом усього року. Вибір класу дронів для конкретних завдань повинен базуватися на аналізі температурних характеристик регіону й особливостях погодних умов у різні сезони.

Водночас проведений аналіз показав, що можливості звичайних дронів (CD) значною мірою залежать від сезонних температурних обмежень, що впливає на тривалість і умови їх експлуатації.

З огляду на це, наведена в роботі техніка дослідження може бути корисною в деяких теренах діяльності із залученням дронів. Наприклад, доцільно вивчати придатність окремих географічних районів на етапі планування військових дій на певному театрі військових дій (ТВД) стосовно типу використання потенційно можливих БПЛА. Крім того, дану методику можна використовувати в галузі маркетингової політики компаній з виробництва та продажу продукції БПЛА. Особливості різних районів потенціальної експлуатації нової продукції з БПЛА можуть бути враховані ще на етапі розробки та планування їх виробництва і продажу. Загалом, дана методика дослідження потребує подальшого вивчення та застосування для даних за більш тривалі періоди та з різними ступенями локалізації відповідно до оперативних завдань. Одним з науково-технічних аспектів більш вузького використання дронів є безпосереднє їх цільове застосування для визначення критичних для БПЛА параметрів атмосфери.

3.2 Просторовий розподіл полів середньої кількості випадків потенційного обмерзання для малих безпілотних літальних апаратів

З огляду на важливість впливу обмерзання на БПЛА та сумісність теми впливу від'ємних температур, наступним доцільно кроком дослідити фактор обледеніння за схожою методикою. Для досягнення цієї мети був здійснений вибір критеріїв для оцінки потенційного виникнення обмерзання на основі вже проведених досліджень. [12] За період, який аналізується, були обрані зимові місяці, оскільки за результатами досліджень обледеніння БПЛА, які літають на малих висотах, це найбільш сприятливий період для обмерзання. Для подальших дій, у якості критеріїв потенційного обледеніння було обрано сполучення двох метеорологічних параметрів – температури та відносної вологості повітря. на основі даних реаналізу NCEP/DOE на рівні 925 гПа за зимові періоди з грудня по лютий за 2010-2020 рік. Даний рівень був обраний з врахуванням середньої висоти польоту малих роторних БПЛА. За випадок потенційного обмерзання було взято поєднання від'ємної температури від 0 до -10 °C та відносної вологості повітря більше 85%. Робота проводилася за допомогою застосунку Microsoft Office Excel, стандартними алгоритмами обробки двовимірних масивів даних. У результаті розрахунків отриманий масив середньої повторюваності потенційного обмерзання за зимовий період з 2010 по 2020 роки, який було поділено на групи з градаціями (0-5, 5-10, 10-15, 15- 20, 20-25 випадків за місяць) та візуалізовано у графічній формі (полів) з прив'язкою до місцевості.

Розподіл середньої за 10 років повторюваності потенційного обмерзання за зимові місяці за період 2010- 2020 рр. представлений на рисунку Б1 додатку Б, демонструє чітко виражену просторову неоднорідність, що обумовлена як загальними кліматичними особливостями регіону, так і дією локальних географічних чинників. Найбільша кількість днів з потенційним обмерзанням спостерігається на півночі Європи – над Скандинавським півостровом, країнами Прибалтики та північно-західною частиною Росії. Ці регіони

відзначаються поєднанням низьких температур і високої вологості. Особливо інтенсивною є зона з частотою обмерзання, яка простягається над північними широтами, охоплюючи частину Кольського півострова та північну Норвегію. Такий характер пояснюється домінуванням арктичного повітря в цих широтах і відсутністю пом'якшувального впливу теплої Північноатлантичної течії (Гольфстріму), яка значною мірою обмежує поширення потенційного обмерзання на північному заході Європи.

На значення повторюваності обмерзання істотно впливають траєкторії руху циклонічних серій, які зазвичай надходять з північного заходу, формуючись над Північною Атлантикою, і переміщуються у південно-східному напрямку через Скандинавію, Балтію та Східну Європу. Такий напрямок переміщення зумовлює характерне розташування зон з підвищеною частотою потенційного обмерзання, які відображають рух вологих і холодних повітряних мас уздовж цієї траєкторії.

Вологість, що надходить із Північної Атлантики, створює умови для обмерзання, особливо у регіонах, де вона взаємодіє з холодним арктичним повітрям. Чітко простежується вплив гірських масивів, зокрема Скандинавських гір на півночі, Кавказьких гір на південному сході та частково Альп у центральній Європі. Важливу роль відіграє також вплив морських акваторій, в прибережних зонах біля Атлантичного океану, Північного, Балтійського, Чорного та Азовського морів, кількість днів з потенційним обмерзанням помітно знижується. Це пояснюється додатковим впливом морської складової у температурно-тепловому балансі приземного шару атмосфери в зимовий період, який має максимальне значення в грудні. У південній частині Європи у Франції, Іспанії, Італії, Греції – обмерзання майже не спостерігається в силу кліматичних особливостей Середземномор'я та Атлантики.

На території України можна простежити широтну диференціацію: з півночі на південь частота обмерзання зменшується. Західні регіони, які прилеглі до Карпат, характеризуються підвищеними показниками

потенційного обмерзання, що пов'язано з впливом гірської системи, яка затримує вологе повітря та створює умови для локального охолодження. Натомість у південних регіонах України, особливо поблизу Чорного та Азовського морів, спостерігається зниження кількості випадків обмерзання, що пояснюється впливом теплішого морського повітря.

Просторовий розподіл потенційного обмерзання у зимовий період демонструє залежність від поєднання кількох ключових кліматичних факторів: широти, типових траєкторій циклонів, близькості до морів і океанів, а також орографічних особливостей місцевості. Виявлені закономірності є логічним відображенням кліматичних особливостей європейської частини Євразійського континенту.

ВИСНОВКИ

У ході виконаного дослідження було проаналізовано вплив метеорологічних умов, зокрема температурного режиму та частоти потенційного обмерзання, на ефективність експлуатації малих безпілотних літальних апаратів з роторними двигунами (RWUAV) на Європейській території Євразійського континенту. Проведено просторову оцінку придатності використання дронів двох класів – звичайних (CD) та стійких до погодних умов (WRD) – у зимовий, весняний та осінній періоди 2010 року.

Результати показали, що звичайні дрони мають суттєві обмеження у зимовий період, тоді як дрони класу WRD демонструють високу ефективність використання протягом усього року, особливо на рівнинних територіях.

Проаналізовано середню повторюваність потенційного обмерзання на висотах польоту RWUAV за допомогою кліматичних даних реаналізу за десятирічний період. Встановлено регіони з підвищеним ризиком потенційного обледеніння, що корелюють з кліматичними особливостями та географічними чинниками (наприклад, вплив північно-атлантичної течії, гірських хребтів, переходу море-суша).

Отримані результати можуть бути використані для планування експлуатації дронів у різних регіонах з метою підвищення ефективності їхнього застосування та зниження економічних витрат, а також для визначення зон ризику в контексті потенційних військових або цивільних завдань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проценко Г. Д. Метеорологія та кліматологія: навчальний посібник / Г. Д. Проценко. – Київ: НПУ, 2007. – 265 с.
2. Telli K., Kraa O., Himeur Y., Ouamane A., Boumehraz M., Atalla S., Mansoor W. A comprehensive review of recent research trends on unmanned aerial vehicles (UAVs) // Systems. – 2023. – Vol. 11, No. 8. – Article No. 400.
3. Meteomatics. Meteodrones – Weather Drones URL: <https://www.meteomatics.com/en/meteodrones-weather-drones/> (дата звернення: 22.05.2025).
4. ETT Aviation. What is Drone-Specific Weather and Why is it Important? URL: <https://ettaviation.com/what-is-drone-specific-weather-and-why-is-it-important/> (дата звернення: 23.05.2025).
5. Singh S. Weather and Flight: How Conditions Affect Drone Operations / Saheel Singh. URL: <https://www.flapone.com/blog/weather-and-flight-how-conditions-affect-drone-operations> (дата звернення: 24.05.2025).
6. Heliguy. Flying A Drone In The Rain: A Guide To IP Ratings URL: <https://www.heliguy.com/blogs/posts/flying-a-drone-in-the-rain-a-guide-to-ip-ratings/> (дата звернення: 24.05.2025).
7. Borup K. T., Hann R., Sørensen K. L., Bernstein B. C., Pellicano P. Icing Impact on UAS and AAM Operations in Selected US Metropolitan Areas: An Icing Climate Assessment for Los Angeles, San Francisco, Chicago, and New York – UBIQ Aerospace – 2024. – P. 6 – 9.
8. Low-Hansen B., Müller N. C., Coates E. M., Johansen T. A., Hann R. Identification of an Electric UAV Propulsion System in Icing Conditions // SAE Technical Paper. – 2023. – 1 p.
9. Hubbard R. P. Space Shuttle Main Engine: The First Ten Years. NASA Technical Reports Server. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19810068625> (дата звернення: 25.05.2025).

10. Zhang C., Wei X., Zhang L., Sun F. Effect of temperature on the performance of lithium-ion battery for electric vehicles // *Energies*. – 2018. – T. 11, №5. – p. 1055.

11. Tramposch A., Thomann M., Kozomara D. Determination of Droplet Impingement on an Octocopter at Different Flight Conditions // *Proceedings of the AIAA SciTech Forum*. – 2021. – Paper No. 2021-2501.

12. Soddell J. R., McGuffie K., & Holland G. J. An In – Flight Airframe Icing Nowcast For Use With The Aerosonde // *University of Technology, Sydney*. – 2007. – P. 4.5.

13. Holland G. J., McGeer T., Youngren H. H. The Aerosonde robotic aircraft: A new paradigm for environmental observations // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2001. – Vol. 82, No. 5. – P. 889 – 901.

14. NOAA Rapid Refresh (RAP) model // *National Oceanic and Atmospheric Administration*. URL: https://rapidrefresh.noaa.gov/?utm_source (дата звернення: 30.05.2025).

15. Sand W. R., Cooper W. A., Politovich M. K., Veal D. L. Icing conditions encountered by a research aircraft // *Journal of Climate and Applied Meteorology*. – 1984. – Vol. 23, No. – P. 1427 – 1440.

16. Lankford T. T. Aircraft Icing: A Pilot's Guide to Supercooled Drizzle Droplets, Icing Accident Case Studies and Cold Weather Techniques. // *Blue Ridge Summit, PA: TAB Books*. – 2000. – 230 – 336 p.

17. Gao M., Hugenholtz C. H., Fox T. A., Kucharczyk M., Barchyn T. E., Nesbit P. R. Weather constraints on global drone flyability // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – Article No. 12092.

18. How often do drones encounter icing conditions? URL: <https://uavicinglab.com/2021/05/26/climatological-icing-report-for-norway-and-surrounding-regions/> (дата звернення: 24.05.2025).

19. Muhammed M., Virk M. S. Ice Accretion on Rotary-Wing Unmanned Aerial Vehicles—A Review Study // *Aerospace*. – 2023. – Vol. 10, No. 3. – Art. 261.

20. Avery A. S. Evaluation of Low Altitude Icing Conditions for Small Unmanned Aircraft // Proceedings of the 9th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. – 2017. – P. 3929.

21. Villeneuve E., Samad A., Volat C., Béland M., Lapalme M. Experimental Investigation of Icing Effects on a Hovering Drone Rotor Performance // Drones. – 2022. – Vol. 6, No. 11. – Art. 345.

22. Rotorcraft Icing // NASA Glenn Research Centre. URL: <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/icing/rotorcraft-icing/> (дата звернення 27.05.2025).

23. Wang Y., Xiong K., Zhu C., Guo R., Chen L. Research on Normal Ice Adhesion Strength in Icing Wind Tunnel. URL: <https://ssrn.com/abstract=4263761> (дата звернення 27.05.2025).

24. Unmanned Aircraft Systems: Different Types of Drones and Uses. URL: <https://www.jouav.com/blog/drone-types.html>. (дата звернення 27.05.2025).

25. How Are Drones Powered? 6 Drone Energy Sources Explained. URL: <https://www.thecoronawire.com/how-drones-powered-6-energy-sourcesexplained/> (дата звернення 28.05.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А

ДОВІДКА

кафедри військової підготовки

до кваліфікаційної роботи

курсанта групи В-21 Сливинського Богдана

на тему: «Вплив метеорологічних параметрів на застосування малих
безпілотних літальних апаратів на Європейській частині Євразійського
континенту»

1. Доповідь на 81-ї звітній студентській науковій конференції ОНУ імені І. І. Мечникова 23-25 квітня 2025 р. за темою «Просторовий розподіл полів критичних значень температури повітря для застосування малих безпілотних літальних апаратів (SUAS) на Європейській території Євразійського континенту» та публікація тез доповіді за результатами конференції на сайті ОДЕкУ. [Електронний ресурс]. Спосіб доступ: https://onu.edu.ua/pub/bank/userfiles/files/rgf/theory_practice_translate/MethodichniVidania/program_81_stud_konf_2025.pdf

Керівник кваліфікаційної роботи

майор

Павло ПОПОВИЧ

Додаток Б

Поля розподілу середньої повторюваності критеріїв потенційного обмерзання

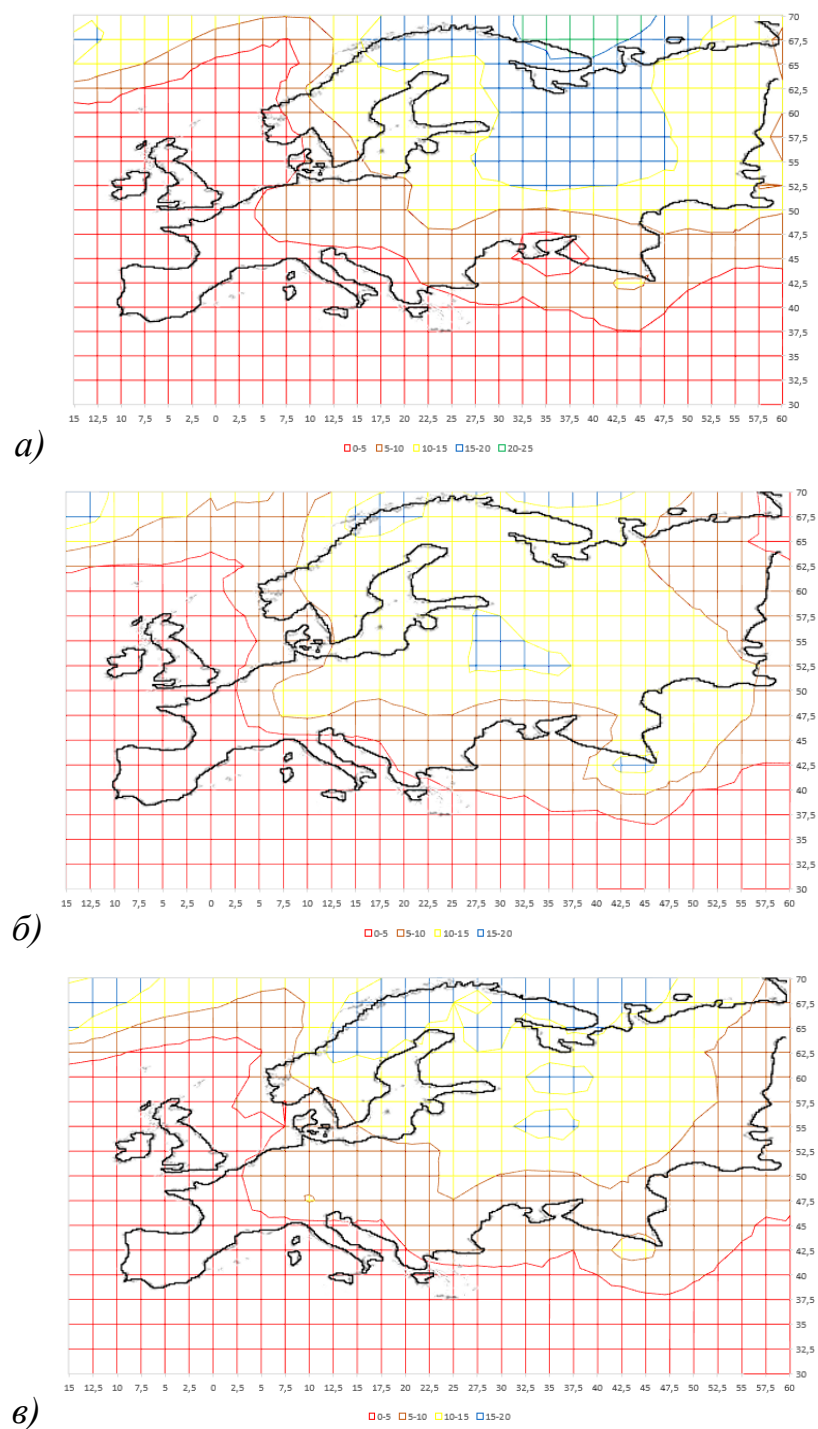


Рисунок Б1 – Поля розподілу середньої повторюваності потенційного обмерзання за 2010-2020 рік за а) грудень, б) січень, в) лютий