

ВІДГУК

офіційного опонента доктора фізико-математичних наук, професора
Стародуба Юрія Петровича
на дисертацію БІЛОГО ТАРАСА АНАТОЛІЙОВИЧА
«Вплив електричного поля Землі на електричні та мікрофізичні
процеси в атмосфері», подану на здобуття
наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю
04.00.22 – геофізика

1. Актуальність обраної теми дисертаційного дослідження та зв'язок із планами і напрямками науково-дослідних робіт наукових установ організацій, державними і галузевими науковими програмами.

Зацікавлення до вивчення динамічних характеристик атмосферної електрики в сейсмоактивних регіонах зародилося давно. Причиною цьому послужило виявлення аномальних ефектів у варіаціях напруженості електричного поля в період підготовки сейсмічної події. Це навело на думку про зв'язок аномалій електричного поля з приземними локальними змінами концентрації літосферних газів, а у вільній атмосфері – появи лінійних хмарних аномалій (ЛХА) над районами підготовки землетрусів. Все це стимулювало інтенсивні дослідження динамічних характеристик електричного поля в багатьох сейсмічно активних регіонах світу.

У регіональні особливості варіацій електричного поля атмосфери, крім метеорологічних факторів суттєвий внесок дає іонізація нижніх шарів атмосфери процесами пов'язаними з дегазацією в землі. Це призводить до аномалій в геофізичних полях які визивають флуктуації електричного поля як у приземному шарі атмосфери, так і в іоносфері. Для врахування цих ефектів необхідно використання комплексної фізичної моделі електричного поля атмосфери, розробці якої і присвячена дана дисертаційна робота. На її основі за експериментальними даними літакового й кулепілотного зондування вивчається вплив електричного поля атмосфери на мікрофізичні процеси в хмарах, а також пояснення умов появи ЛХА, стратифікації хмарності, її розвиток та формування опадів і снігопадів над територією України, які призвели до надзвичайного стану.

Дисертаційна робота виконана на базі відділу Глибинних процесів Землі і гравіметрії Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України за наступними науковими темами:

- Комплексне геолого-геофізичне вивчення глибинної будови південно-західної окраїни Східноєвропейської платформи з метою розширення мінерально-сировинної бази України (2007–2010), № р/н 0106U000911;

- Побудова тривимірної геолого-геофізичної моделі південної окраїни ССР та її обрамлення з метою розширення мінерально-сировинної бази України (2011–2015) № р/н 0111U000236;

- Комплексне геофізичне дослідження літосфери України: від моделей до процесів формування родовищ корисних копалин (2016–2020) № р/к 0116U000131;

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їхня достовірність і наукова новизна.

Обґрунтованість та достовірність сформульованих у дисертації наукових положень. Достовірність та обґрунтованість наукових положень і висновків забезпечується коректним застосуванням широкого спектру методів досліджень, чіткою фізичною постановкою задачі, дотриманням початкових та граничних умов, строгим виконанням всіх математичних перетворень під час отримання основних аналітичних співвідношень для хвильового електричного поля атмосфери.

Крім того, достовірність результатів роботи підтверджується високою кореляцією отриманих розрахунків із результатами, які одержані за допомогою незалежних експериментальних спостережень, та ретельним тестуванням створених моделей з використанням пакетів Wolfram Mathematic та Compaq Visual Fortran.

Наукова новизна дисертаційної роботи Білого Тараса Анатолійовича полягає в тому, що в роботі здійснено теоретичне і практичне обґрунтування отриманих ним нових результатів, що в сукупності вирішують важливе наукове-прикладне завдання – вплив електричного поля на мікрофізичні процеси в хмарах та глобальну стратифікації хмар.

У дисертації сформульовані положення, які визначають наукову новизну отриманих результатів, слід відмітити окремі з них, що мають найбільше значення для геофізики та фізики атмосфери.

- Вперше розроблено аналітичну модель середнього самоузгодженого електричного поля атмосфери, яка описує стратифікацію зарядженої підсистеми в електричному та гравітаційному полях. Модель представлена розв'язком нелінійного рівняння Пуасона, який істотно залежить від граничних умов на поверхні Землі, а саме, від збурення приземного локального електростатичного поля від джерел геофізичних процесів. Для вивчення поляризації електрон-іонної підсистеми атмосфери в полі сили тяжіння розроблено лінійний аналог рівняння Пуасона, де базовими функціями є функції Ейрі, який суттєво відрізняється від класичного наближення Дебая тим, що на масштабі довжини екранування Дебая електричне поле осцилює.
- Вперше отримано аналітичне рівняння динамічної діелектричної проникності як функції локального потенціалу і градієнта потенціалу електричного поля. У лінійному наближенні дифузійне рівняння діелектричної проникності описується W-функцією Ламберта. На основі цього розраховано серію мультиплікативних поправок до больцманівського фактора ймовірності, де введено перевизначений термічний потенціал електрона, який враховує ϵ . Це дозволяє враховувати масштабованість електричного поля атмосфери при переході від мікро- до макро-масштабу, чого не існує в сучасних моделях електрики атмосфери.
- Вперше розроблено електричний блок тривимірної моделі фізики хмар для чисельного моделювання катастрофічних опадів, пов'язаних з

електричною коагуляцією та доведено вплив електричного поля на ефективність зіткнення заряджених крапель як одного з механізмів різкого збільшення опадів за рахунок швидкого утворення ядер конденсації. Показано, що для напруженості електричного поля $E_z \sim 10^3$ В/см саме електрична коагуляція є суттєвою і її необхідно застосовувати при моделюванні потужних конвективних хмар, які знаходяться в стадії максимального розвитку. На даний час в Україні не запропоновано тривимірної моделі, яка просторово враховує вплив електричного поля на мікрофізичні процеси в хмарах.

- Доведено на основі статистичного аналізу сезонну стійкість градієнта напруженості електричного поля E_z з висотою, яка становить 18÷22 повних коливань. Виявлено кореляційну залежність між екстремумами висоти нижньої межі хмар і вертикальним розподілом вологи від рівноважних точок градієнта E_z . Доведено, що середньорічні розподіли водності та напруженості електричного поля мають високий коефіцієнт кореляції ($R > 0,8$). Ці дослідження проведені вперше, так як завжди вважалося, що внесок електричного поля в стратифікацію атмосфери несуттєвий в порівнянні з розподілом температури повітря по висоті.

3. Практичне значення отриманих результатів. Розроблена методика та алгоритми які побудовані на принципово нових аналітичних та чисельних моделях, які відповідають сучасним уявленням про електричні та мікрофізичні процеси в атмосфері. Методика передбачає використання при вивченні можливостей активного впливу на процеси в хмарах; визначення ролі електричних сил у процесах розвитку та розпаду хмар; побудову моделей глобального атмосферно-електричного ланцюга та електродного шару атмосфери; розробку методик наземних атмосферно-електричних спостережень; в екології – вдосконалення методів моніторингу інтегрального забруднення приземного шару атмосфери за допомогою атмосферно-електричних спостережень; у геології – вдосконалення методів пошуку корисних копалин, заснованих на даних про іонізацію атмосфери та вміст у ній радону.

Методи дисертаційного дослідження впроваджені в освітній процес підготовки здобувачів вищої освіти в Гідрометеорологічному інституті Одеського державного екологічного університету.

4. Оцінка змісту, стилю та мови дисертаційної роботи, її завершеності та оформлення.

Дисертаційна робота Білого Тараса Анатолійовича в цілому є завершено науковою працею. Вона складається з переліку умовних скорочень і символів, вступу, шести розділів, висновків і списку використаних джерел, що включає 346 найменувань. Разом з рисунками і таблицями робота містить 327 сторінок машинописного тексту, 72 рисунки, 20 таблиць та 8 додатків.

У вступі викладено загальну характеристику роботи, обґрунтовано доцільність обраного напрямку та актуальність дисертації, сформульовано мету, основні методи і задачі досліджень, визначено наукову новизну

отриманих результатів, сформульовані основні наукові та практичні досягнення здобувача, а також подано інформацію щодо апробації одержаних результатів, публікацій, структури й обсягу роботи.

Перший розділ присвячено аналітичному огляду основних методів, які використовуються в області атмосферної електрики та літосферно-атмосферно-іоносферних зв'язків. Здобувач надає критичний огляд всіх існуючих, у переважній більшості, достатньо спрощених модельних, багаточисленних емпіричних моделей та обґрунтовує те, що більшість існуючих гіпотез і моделей, в своїй основі, виявляють підвищений інтерес до процесів, що відбуваються в приземному та конвективному атмосферному граничному шарі і мають труднощі опису електричних і мікрофізичних характеристик по вертикалі. Це пов'язано з тим, що мікрофізичні і особливо електричні процеси в конвективних хмарах до теперішнього часу залишаються маловивченими. Такий стан справ пояснюється їх складністю та суттєвою недоступністю для експериментального дослідження. У зв'язку з цим розробка чисельної моделі хмар і вивчення на її основі різних питань хмаро- і опадоутворення, а також електричних процесів, що впливають на коагуляцію хмарних частинок, є важливою науково-прикладною проблемою.

У **другому розділі** викладено основні електричні характеристики атмосфери. Розглянуто зони формування зарядової нестабільності атмосфери та наведено основні масштабні співвідношення ступеня збудження для рідбергівських частинок від функції радіального квантового числа n .

Здобувачу довелося подолати інерцію наукового оточення, яке звикло до широко поширених теорій атмосферної електрики, та розглянути заряджену підсистему атмосфери як електроактивне середовище, в якому разом із іонами та електронами розглядаються збуджені атоми і молекули. Урахування збуджених і рідбергівських молекул призводить до змін рухливості і дифузії електронів, а також масштабування ван-дер-ваальсових та кулонівських взаємодій. Час життя збуджених молекул становить десятки секунд. Утворившись за рахунок іонізації, збуджені молекули практично локалізуються (накопичуються) в зонах з максимальним градієнтом поля, створюючи багатшарову стратифікацію атмосфери електричним полем. Здобувач підтверджує свою думку низкою детальних оцінок та показує, що за умови порівняно середніх рідбергівських збуджень, збуджені атоми і молекули віддають електрон у активне середовище беручи участь в електропровідності атмосфери. Вольт-амперна характеристика атмосфери, яку приводить здобувач, істотно складніша, ніж представлені класичні схеми розділення атмосфери і має гістерезисні петлі, які відокремлюють одна від одної стратифіковані зони. Особливо це проявляється в тропосфері.

За оцінками автора атоми і молекули, що мають надлишкову кількість внутрішньої енергії, у порівнянні з розподілом Больцмана, утримують цей стан тривалий час істотно, змінюючи уявлення про електричну частину атмосфери, що формує електростратифікацію тропосфери і стратосфери, вносячи порівнянний, а часом і більший вклад у повну теплову енергію цільних шарів, ніж підсистема радіаційно збудженого газу. Для тропосфери

масштабованість кулонівської взаємодії за рахунок збуджених атомів дозволяє на якісному рівні зрозуміти механізм конденсації водяної пари на заряджених центрах зміною кількості збуджених молекул за рахунок неоднорідної іонізації.

Такий підхід є не тривіальним, так як у фізиці плазми зазвичай ігнорується факт, що іонізація атома або молекули відбувається через збуджений стан квантової системи, оскільки радіаційна ширина випромінювання симетричних систем складає, навіть у триплетних станах, малі часи 10^{-8} – 10^{-9} с. Тому уявлення про вертикальний розподіл збуджених частинок, як про одну з фундаментальних особливостей електричної будови атмосфери, покладено здобувачем у основу побудови одновимірної моделі середнього електричного поля атмосфери та аналізу стратифікації хмар електричним полем.

У **третьому розділі** за допомогою методу статистичного аналізу розглядається стратифікація електричного поля та морфологічна стратифікація хмар електричним полем атмосфери в період активного і спокійного Сонця.

Для характеристики напруженості електричного поля на різних висотах у роботі використовувалися дані, отримані за програмою Міжнародного геофізичного року і Міжнародної геофізичної співпраці у 1958–1964 рр. На підставі обчислення середніх багаторічних значень на усіх рівнях для кожного дня з 1958 по 1964 рр. автором побудовано сезонні сплайн-апроксимації вертикального розподілу градієнта напруженості електричного поля та отримано висновок, що експериментальний розподіл має квазістаціонарний вигляд у якому кількість повних коливань поля становить 19–22 значень. Це спостерігається для усіх сезонів року за увесь період літакового зондування. Усереднений за весь період спостережень масив даних виявляє ту саму структуру, що і моментні спостереження (щоденне зондування). Тому картина є не тільки модо-стійкою, але й подібною. Фіксація вузлових площин не характерна для лінійних задач, які використовуються в метеорології, де при зміні граничних умов відбувається зміна складу мод і зрушення вузлових точок суми мод. Просторова і тимчасова структури електричного поля не є гармонійними функціями класичної електростатики з використанням аналітичних сплайнів.

Далі здобувач продовжує свою думку та ставить питання: яким чином зв'язані вертикальний розподіл хмар із стратифікованим електричним полем. Для цього будуються частотні діаграми повторюваності висоти утворення нижньої межі (н.м.) хмарності по морфотипам, за цей же період, та шукається кореляційний зв'язок між н.м. хмар та стратифікованим електричним полем. В якості предиктора здобувач обрав н.м. хмар, тому що, як відомо з термодинамічної точки зору, утворення хмар відбувається поблизу потрібної точки конденсації, а наявність електричного заряду того або іншого знаку на ядрах конденсації призводить до зменшення рівноважної пружності водяної пари, необхідної для утворення на ній крапель.

Як показали оцінки висота повторюваності н.м. хмар співпадає з серединною стратифікацією електричного поля (локальними точками зарядової рівноваги). У більшості випадків висота хмар відповідає горизонталі, де градієнт поля перетворюється на нуль і становить ($\pm 50 \div 100$ м) при вертикальній протяжності хмарного шару – $250 \div 500$ м. Співпадіння спостерігається для усіх видів хмар, а також для усереднення за сезонами і роками. Коефіцієнт кореляції R дорівнює 0,9 при довірчому інтервалі 0,95 %. Аналогічний результат отримано для вертикального розподілу водності в стратифікованому електричному полі. Як показали оцінки водність добре групується відносно величини електричного поля. Здобувач це пояснює тим, що зі збільшенням водності термодинамічно зростає середній розмір крапель, збільшується геометрична площа перерізу частинок і зростає іонізація конденсованої фази. Отже, полярноактивна фаза, накопичуючись у шарі (екстремум електричного поля) у молекулярній формі (молекули і комплекси $(H_2O)_n$), спричиняє накопичення мікрокрапель водяної пари в екстремумах електричного поля атмосфери. Цей результат є новим і в такій постановці не розглядався.

У **четвертому розділі** вирішується завдання розробки та параметризації одновимірної аналітичної моделі середнього самоузгодженого електричного поля атмосфери за експериментальними даними. У межах побудованої моделі досліджується стратифікація атмосфери електричним полем, а також механізм стабілізації ЛХА.

У цьому розділі здобувач розглядає електрику атмосфери «гарної» погоди, залучаючи класичний підхід, тобто, для пошуку напруженості електричного поля та густини об'ємних електричних зарядів за висотою, використовує рівняння Пуассона. Однак робиться припущення, що заряджена підсистема атмосфери розглядається як квазінейтральна електрон-іонна холодна плазма, в якій перенос здійснюється квантово-механічним чином. Такий підхід використовується в моделюванні динаміки багатьох частинок і для задач електрики атмосфери здобувачем застосований вперше. Врахування збуджених частинок в кулонівській плазмі, як було зазначено вище, дозволяє враховувати ефект аномальної затримки рекомбінації, який призводить до необхідності відмовитися від давно сформованих уявлень про основи статистики класичних термалізованих (канонічних) систем.

Здобувач розв'язує нелінійне рівняння Пуассона та отримує загальний, а в наближенні сталих коефіцієнтів – точний розв'язок у вигляді еліптичного синуса Якобі. При параметризації цього рівняння автор пропонує два варіанти роботи з константами: а) підстановка кінетичних коефіцієнтів у константу екранування, період і модуль еліптичного інтеграла; б) визначення констант за експериментальними профілями поля або його відрізка. Для атмосфери перший випадок дає весь спектр осциляцій аж до дебаївської довжини екранування – «пила», другий – ефект параметричного розгойдування. Результати моделювання дуже добре відповідають експериментальним спостереженням.

Далі автор ускладнює задачу і для врахування поляризації важких іонів та аерозолі в полі сили тяжіння отримує аналог рівняння Пуасона – рівняння другого порядку для потенціалу Ейрі. Це рівняння відрізняється від класичного наближення Дебая тим, що на масштабі довжини екранування Дебая електричне поле осцилює. Коефіцієнти рівняння складним чином (похідні від функцій Ейрі) залежать від граничних умов на поверхні Землі, а варіювання приземної напруженості електричного поля суттєво змінює вертикальний розподіл потенціалу.

Якщо в атмосфері присутні заряджені водяна пара і хмарний аерозоль, то самоузгоджене рівняння Пуасона відрізнятиметься підвищеними середніми напруженостями поля і зарядами частинок аерозолі від випадку для «гарної» погоди. Тоді, щоб отримати самоузгоджене рівняння для хмарного аерозолі, здобувач усереднює больцманівський чинник з розподілу частинок у хмарі, вважаючи заряд аерозольної частинки як параметр. Після математичних перетворень здобувач отримує аналог рівняння Пуасона для хмарного аерозолі. Як показало моделювання області флуктуацій потенціалу значно ширша ніж для електростатичного поля стандартної атмосфери. Виділилася внутрішня область флуктуаційної нестійкості і фазової межі як механізм стратифікації. Перерозподіл зарядових ступенів свободи призводить до більш вираженої межі хмари та ергодичних флуктуацій поля усередині потенційної ями. Зарядові ступені свободи призводять до самоузгодженого потенціалу із ще більш вертикальними стінками – чіткої межі фази. Для гідродинамічних систем це пояснює самоузгоджене (бездифузійне) переміщення хмари в горизонтальному напрямку, а також глобальну стратифікацію та перенесення водяної пари.

Наступним етапом ускладнення моделі є врахування ефекту поляризації збуджених частинок у рівнянні Пуасона. Механізм електростратифікації збудженої підсистеми атмосфери здобувач розглядає у наближенні середнього самоузгодженого електричного поля при врахуванні тільки вільних зарядів. У цьому випадку в рівняння Пуасона вводиться доданок, який відповідає за поляризацію. Наявність поляризаційної частини призводить до розкладання щільності електронів на щільність зв'язаних електронів та електронів розсіювання. Такий підхід дозволяє ввести енергію поляризації збудженої частинки до больцманівської експоненти як компоненту зв'язаних зарядів.

Зважаючи на заряджену збуджену підсистему атмосфери, здобувач робить припущення, що у рівняннях руху фази в лагранжевій формі має бути присутнім тензор напруження для потенційної сили електричного поля в середовищі, що містить діагональні компоненти і просторову дисперсію діелектричної проникності. Після розв'язання даної задачі здобувач робить два важливі зауваження:

При описі стратосфери в рівняння гідродинаміки повинна входити не сила, прикладена до точкового заряду, а тензор напруження усієї системи розподілених зарядів, що включає неточкову модель електрона Лоренца;

Поляризаційний доданок є джерелом поля в дотичних площинах за рахунок дипольних і поляризаційних ван-дер-ваальсівських доданків. Дотичне напруження тензора електричного поля є діагональним ефективним потенціалом, який формує систему в горизонтальних площинах (формує стратифікацію).

Це говорить про те, що поляризаційний доданок є додатковим джерелом сили, що стабілізує збуджені і полярні молекули в горизонтальних шарах, а також при формуванні хмар верхнього ярусу. Стосовно хмар, на думку автора, характер електростатичного напруження зсувного типу може визначати тип хмари, наприклад Ci (цируси) або Cs (циростратуси).

У **п'ятому розділі** досліджується просторова дисперсія комплексної діелектричної проникності є як додатковий фактор стратифікації атмосфери електричним полем.

Оцінка просторової дисперсії комплексної діелектричної проникності є проводиться в наближенні поляризаційного диполя з уявною діелектричною константою на основі правої частини самоузгодженого рівняння Пуасона. Верифікацію рівняння проведено за незалежним експериментальним набором даних: а) синхронними приземними спостереженнями позитивних і негативних іонів; б) напруженістю електричного поля атмосфери на різних висотах за матеріалами літакового зондування.

Для оцінки просторової дисперсії діелектричної проникності здобувач застосовує декілька підходів.

Перший підхід – розрахунок ϵ в наближенні активного середовища, заснований на чисельній стійкості величини середнього геометричного для іонів нижньої атмосфери без окремої реєстрації позитивної та негативної компонент іонів. Такий підхід дає можливість коректної модифікації больцманівського розподілу для масштабів від мікропольового до макропольового введенням ефективних комплексних показників у околі іонно-звукових коливань повного спектра ленгмюрівського дисперсійного співвідношення. Мікропольовий розподіл залежить, згідно з модулем функції Якобі, від щільності енергії в одиниці об'єму середовища, тоді як канонічний розподіл залежить тільки від термодинамічної температури.

Другий підхід заснований на прямому розрахунку діелектричного відгуку середовища за даними вимірювання іонізації повітря з окремою реєстрацією позитивної та негативної компонент іонів. Такий підхід дозволяє за допомогою рівноважних концентрацій іонів отримати співвідношення ефективної діелектричної проникності. Оцінки, які наводить здобувач, показують, що параметр ϵ варіює в широких межах, так як залежить від локального електронного дефіциту або виконання умов квазінейтральності. Наближення елементарного об'єму до електронейтральності призводить до збільшення константи діелектричної проникності до значень порядку 10^3 – 10^4 CGSE та більше. Таким чином, здобувач робить висновок, що для практичних оцінок самоузгодження поля електронів атмосфери необхідно перевизначення больцманівського мікроканонічного розподілу до мікропольового за рахунок включення константи екранування. Автор

відзначає, що порядок величин константи екранування, отриманої за натурними даними та сучасними методами молекулярної динаміки, співпадають. Введення ефективної діелектричної проникності дозволяє зберегти форму рівняння Пуассона та отримати розв'язок виділенням комплексної частини загального розв'язку.

При урахуванні ефекту середовища здобувач отримує трансцендентне рівняння для константи діелектричної проникності, розв'язком якого є W -функція Ламберта. Урахування в розв'язанні уявної частини є призводить до появи областей локалізації на відміну від лінійного тренда дійсної частини. Області локалізації мають характерний розмір 50–100 м, що добре узгоджується з характерним масштабом стратифікації електричного поля.

У випадку динамічного узгодження здобувач отримує рівняння динамічної діелектричної проникності як функцію локального потенціалу і градієнта потенціалу. Цей результат отримаю вперше і не має аналогів в літературі.

Таким чином, врахування динамічної є в моделі електричного поля призводить до масштабування атмосфери наступними ефектами: а) великі значення $\epsilon \sim 10^5 \div 10^6$ прямо пов'язуються з процесами іонізації в атмосфері швидкими частинками, створюючи збуджені та рідбергівські атоми і молекули; б) середні значення $\epsilon \sim 10^3 \div 10^4$ – з глобальною хвилею поляризації теплових електронів в гравітаційному полі; в) маленькі значення $\epsilon \sim 10 \div 10^2$ – з колективними нелінійними плазмовими модами (брізерні рішення), та іонно-звуковими коливаннями нелінійного резонансу.

У шостому розділі на основі чисельного моделювання досліджується вплив електричного поля на ефективність зіткнення заряджених крапель як одного з механізмів різкого збільшення опадів. Отримано оцінки зміни мікрофізичних характеристик хмарності без, та з урахування електричних сил.

Для моделювання еволюції мезомасштабних хмарних утворень у часі і просторі здобувачем використовується система інтегродиференціальних рівнянь, яка описує динаміку і термодинаміку атмосфери, а також розподіл хмарних частинок за розмірами. Система інтегродиференціальних рівнянь розв'язувалася методом розщеплення на окремі підсистеми. Чисельна схема, яка застосовувалася для інтегрування рівнянь у часткових похідних, складалася з послідовності кінцево-різницевої схем, для кожної з яких розроблявся свій метод вирішення. Мікрофізична частина формувалась шляхом нуклеації пари на ядрах конденсації і льодоутворення з подальшим зростанням (випаровуванням) частинок. Включались процеси замерзання крапель, озернення кристалів, коагуляції великих крапель з дрібними та ін.

Здобувачем було проведено математичне моделювання небезпечних та особливо небезпечних атмосферних явищ над територією України, а саме – у серпні–вересні 2002 р. над Кримським півостровом і з 21 по 27 липня 2008 р. в Західній Україні. Як показали результати розрахунків при прогнозі особливо небезпечних явищ погоди, сильних і катастрофічних опадів, крім

інших факторів, як основний предиктор використовувалась ентропія. Виходячи з комбінованих розрахунків ентропії і хмарності автор робить висновок, що зниження ентропії сухого повітря може бути надійним предиктором для визначення епіцентрів сильних опадів. Часовий та просторовий розвиток ентропії добре узгоджується з розподілом хмарності та опадів. Ентропія вологого повітря за просторовим розподілом краще узгоджується з хмарністю, ентропія сухого повітря – з опадами. Епіцентри опадів практично збігаються з епіцентрами знижених значень ентропії сухого повітря.

Вперше шляхом чисельного експерименту змодельована поведінка хмарної системи у період землетрусу при природному розвитку атмосферного процесу і при зміненому тиску в епіцентрі землетрусу. Щоб врахувати зміни атмосферного тиску, здобувачем розроблений алгоритм, який моделює варіації приземного атмосферного тиску в епіцентрі землетрусу. У рамках моделі проаналізовано й отримано деякі результати, що дозволяють оцінити вплив локальної зміни тиску (в період сейсмічної активності) на динаміку хмарності і термодинамічні характеристики атмосфери. Було показано, що якщо підвищення тиску спостерігається тривалий період часу (близько 9 год.), це істотно позначається на максимальному значенні водозапасу хмарності, на займаних її площах, а також на термодинамічних характеристиках. Вплив тиску на хмарність проявляється через декілька годин після зміни і відбувається не радикально, а поступово.

Для впливу електричного поля на мікрофізичні процеси в хмарах здобувачем доповнено тривимірну модель фізики хмар електричним блоком для моделювання катастрофічних опадів, пов'язаних з електричною коагуляцією. Автором проведено ряд чисельних моделювань із дослідження взаємозв'язку мікрофізичних характеристик і електричних процесів у хмарах та досліджено механізм зворотного зв'язку між укрупненням частинок у хмарі і зростанням об'ємного заряду. Доведено вплив електричного поля на ефективність зіткнення заряджених крапель як одного з механізмів різкого збільшення опадів за рахунок швидкого утворення ядер конденсації. Показана присутність широких площ позитивних об'ємних зарядів у верхній частині хмарності і смуг негативних зарядів у нижній шарі, що добре узгоджується з існуючими експериментальними результатами. Просторово-часовий розподіл визначається мікрофізичними особливостями хмарності, та її еволюцією. Як правило зі збільшенням потужності хмари збільшується її електрична неоднорідність. Цей результат використовується вперше.

Дисертацію Білого Т.А. та її автореферат написано державною мовою з дотриманням стилю, належним чином оформлено й проілюстровано необхідними й достатніми за обсягом табличними, графічними та картографічними матеріалами.

5. Дискусійні положення, зауваження та пропозиції.

У цілому оцінюючи позитивно дисертаційну роботу Білого Тараса Анатолійовича, вважаю за доцільне зауважити та звернути увагу на такі дискусійні положення:

1. У розділі 1.2. Лінійні хмарні аномалії як індикатор літо-атмосферних зв'язків наведено серія рисунків (1.2.1–1.2.5) та вказано магнітуду землетрусів, яка становить 3–4 балів по шкалі Ріхтера. Визиває сумнів, що такі малі землетруси можуть викликати атмосферні аномалії (ЛХА) на відстані 250–500 км від епіцентру землетрусу, наприклад, як наведено в дисертації: «Епіцентр Румунського землетрусу знаходиться на 250–300 км на північний захід від ЛХА і виходить за межі супутникового знімку».

2. В дисертаційній роботі, розділ 2, загальний стан електричних характеристик атмосфери дуже насичений вузькою спеціалізованою термінологією: рідбергівська підсистема, рідбергівські частинки, збуджені молекули, гіперполяризованість електронів та інше. Дана термінологія характерна для стратосфери, але здобувач застосовує її для тропосфери.

3. На рис. 3.3.1 та рис. 3.4.4 здобувач наводить частотні діаграми повторюваності висоти н.м. хмарності та робить висновок, що особливістю загального розподілу висоти утворення н.м. хмарності є наявність горизонтів, де хмарність відсутня за увесь період спостережень. Не зовсім зрозуміло чому здобувач робить цей висновок, так як хмари не обмежуються тільки н.м., а й мають вертикальний розподіл. Що має на увазі здобувач під фразою «наявність горизонтів, де хмарність відсутня».

4. При розрахунку відгуку діелектричного середовища за даними вимірювання іонізації повітря здобувач отримує оцінки ϵ які мають порядок 10^3 , 10^4 СГСЕ. Як відомо для сухого повітря радіочастотні виміри ϵ дорівнюють одиниці. Для яких частот розраховується відгук діелектричного середовища?

5. У шостому розділі здобувач вивчає вплив електричного поля на коагуляцію крапель. Загальновизнано, що в помірних широтах домінуючу роль відіграє механізм Фіндайзена-Бержерона, надалі посилений механізмом Ленгмюра. З міркування автора видно, що він, головним чином, сподівається на електричну коагуляцію. На чому ґрунтується здобувач, коли віддає перевагу у формуванні опадів електричної коагуляції?

6. На стор.84 другий абзац «Важливо зазначити, що сума квантового виходу [електрон/фотон] УФ-випромінювання Φ_0 , оже-іонізації $\Phi_{\text{іон}}$, ...» має повтор на стор. 103; На стор. 200 рис. 5.2.2 повторюється на стр. 206. у вигляді рис. 5.3.1: На стор. 320 на рис. 3.2.1 наведено сплайн-апроксимацію

градієнта напруженості електричного поля, але у підпису рисунка говориться про щільність об'ємного заряду.

7. Поданий в авторефераті рисунок 1, не має графічного аналогу в дисертації, лише наведено сезонні зміни (додаток 1), за якими побудований зазначений рисунок автореферату.

8. У роботі зустрічається ряд описок та неточностей, зокрема, у використанні української мови: наприклад на стор. 4 – «производніе», на стор. 17 – «джерел к розділу», на стор. 23 – «емпиричних» і т.п.

6. Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій опублікованих працях.

Основні наукові результати та висновки, викладені в дисертаційній роботі, одержані автором особисто або в співавторстві та опубліковані в журналах, які входять до затвердженого МОН Переліку наукових фахових видань України з фізико-математичних наук. За темою дисертації автором опубліковано 29 наукових праць: статей – 20 (4 входять до міжнародних наукометричних баз Scopus, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory), з них 7 – без співавторів і 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях і симпозіумах.

7. Ідентичність змісту автореферату і основних положень дисертації.

Зміст автореферату цілком точно відображає всі результати та положення дисертаційної роботи.

8. Відповідність дисертації вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» та нормативних актів МОН України.

Кандидатська дисертація Білого Т.А. відповідає вимогам п.п. 9,11,12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами, які внесені згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р. та № 567 від 27.07.2016 р.) щодо дисертаційних робіт, які подаються на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, інших нормативних актів МОН України та паспорту спеціальності 04.00.22 – геофізика.

9. Загальний висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота Білого Тараса Анатолійовича «Вплив електричного поля Землі на електричні та мікрофізичні процеси в атмосфері» значним чином розвиває та розв'язує низку складних, актуальних та значущих проблем сучасної геофізики, фізики атмосфери та атмосферної електрики. Дисертацію присвячено актуальній темі, основні наукові положення і висновки є обґрунтованими та достовірними й достатньо висвітлені в наукових публікаціях, а отримані результати сукупно свідчать про вирішення конкретного наукового завдання – впливу електричного поля

на мікрофізичні процеси в хмарах та глобальну стратифікації хмар.
Зауваження рецензента не зменшують вартість дисертаційної роботи.

Дисертація є завершеним самостійним науковим дослідженням, містить наукову новизну, має практичне значення, а сам здобувач Білий Тарас Анатолійович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 04.00.22 – геофізика.

**Доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри цивільного захисту
та комп'ютерного моделювання екогеофізичних процесів
Львівського державного університету
безпеки життєдіяльності**

Стародуб Юрій Петрович

Підпис проф. Стародуба Ю.П.

Учений секретар

Р.В. Лавренчик

14.09.18

