

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

Голуб Марії Юріївни

«Часові варіації рівня флуктуацій геомагнітного поля»,

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 Природничі науки

за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали

1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації та виконанні індивідуального плану навчальної та наукової роботи.

Аспірантка Голуб Марія Юріївна виконала у повному обсязі індивідуальний план виконання освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Освітня програма в обсязі 40 кредитів ECTS виконана у повному обсязі. Вона успішно склала наступні дисципліни:

Заліки:

- 1) «Філософські засади та методологія наукових досліджень» – 100 балів;
- 2) «Підготовка наукових публікацій та презентацій результатів досліджень» – 95 балів;
- 3) «Інформаційні технології у прикладній фізиці» – 92 балів;

Іспити:

- 4) «Іноземна мова для аспірантів (англійська мова)» – 95 балів;
- 5) «Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів» – 95 бали;
- 6) «Актуальні проблеми сучасної радіофізики та електроніки» – 95 балів;

Всі заплановані види робіт були виконані своєчасно. Здобувачка плідно співпрацювала з науковим керівником протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

2. Обґрунтування вибору теми дослідження.

Геомагнітне поле Землі є одним із фундаментальних геофізичних факторів, що визначає характер взаємодії планети з потоками заряджених частинок сонячного та галактичного походження. Воно формує магнітосферу, забезпечує екранування біосфери від високоенергетичного випромінювання та відіграє важливу роль у процесах, що відбуваються в іоносфері та навколоземному космічному просторі. Стан геомагнітного поля характеризується як квазістаціонарною складовою, так і складною системою часових варіацій різних масштабів, зумовлених внутрішніми та зовнішніми джерелами.

Особливий науковий інтерес становлять часові варіації рівня флуктуацій геомагнітного поля, які відображають динаміку нестационарних процесів у системі Сонце – міжпланетне середовище – магнітосфера – іоносфера – атмосфера Землі. Флуктуації геомагнітного поля охоплюють широкий спектр часових масштабів – від секундних і хвилинних пульсацій до добових та багатодобових збурень – і є чутливим індикатором змін стану космічної погоди.

Часові варіації рівня флуктуацій геомагнітного поля зумовлюються як природними факторами, зокрема змінами параметрів сонячного вітру, міжпланетного магнітного поля, розвитком магнітних бур і сумбур, так і антропогенними впливами. До останніх належать, зокрема, активні радіофізичні експерименти з нагрівом іоносферної плазми потужним високочастотним радіовипромінюванням, які можуть спричинити локальні та регіональні зміни електродинамічних процесів у верхній атмосфері.

Дослідження часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля є важливим як з фундаментальної, так і з прикладної точки зору. Воно сприяє поглибленню уявлень про механізми передачі енергії та імпульсу в геокосмічній системі, розвиток турбулентності в магнітосферно-іоносферному середовищі, а також дозволяє вдосконалювати методи діагностики стану космічної погоди. Практичне значення таких досліджень зумовлене необхідністю прогнозування геомагнітних збурень, які можуть впливати на роботу супутникових систем,

засобів радіозв'язку, радіолокації, навігації, радіоастрономії та енергетичних мереж.

У зв'язку з цим дослідження часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля є актуальною науковою задачею сучасної геофізики та фізики геокосмосу, що потребує застосування сучасних методів аналізу часових рядів, зокрема спектральних і системних підходів, для виявлення закономірностей, характерних часових масштабів і фізичних механізмів формування спостережуваних збурень.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження часових варіацій рівня флуктуацій геомагнітного поля та встановлення їхніх характерних часових масштабів і фізичних механізмів формування, викликаних дією потужних джерел енерговиділення різної фізичної природи.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно розв'язати такі основні завдання:

1. Проаналізувати часові ряди компонент геомагнітного поля з використанням сучасних методів обробки експериментальних даних.
2. Встановити закономірності розвитку геомагнітних бур різної інтенсивності у 24-му та 25-му циклах сонячної активності на основі статистичного, просторово-часового та енергетичного аналізу.
3. Виявити характерні інтервали підсилення та ослаблення флуктуацій і визначити моменти початку та завершення збурених станів.
4. Встановити закономірності та механізми формування геомагнітних ефектів, що супроводжують різні природні процеси – землетруси, потужні вулканічні вибухи, сонячні затемнення – на основі комплексного аналізу варіацій геомагнітного поля.
5. Надати фізичне тлумачення спостережуваних флуктуацій з урахуванням процесів у магнітосферно-іоносферному середовищі.

Об'єкт дослідження – геомагнітне поле Землі як складова динамічна система.

Предмет дослідження є часові варіації рівня флуктуацій компонент геомагнітного поля та їхні спектрально-часові характеристики.

Методи досліджень. Обробка експериментальних даних здійснюється з використанням сучасних програмних засобів і баз даних геофізичних спостережень.

У дисертації застосовано методи аналізу часових рядів геомагнітного поля, системний спектральний аналіз, просторове порівняння даних магнітометричних станцій різних широт, статистичний аналіз індексів геомагнітної активності, а також фізичну інтерпретацію результатів у рамках моделей сонячно-земних і літосферно-іоносферних зв'язків.

3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

У дисертації наведено результати досліджень, виконаних автором з її науковим керівником протягом 2022–2026 рр. відповідно до перелічених нижче науково-дослідних робіт кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

1. Великомасштабні та глобальні фізичні процеси в системі Земля–атмосфера–іоносфера–магнітосфера природного та техногенного походження (2022–2024 рр.), номер держреєстрації 0122U001476 (виконавець напрямку).

2. Проєкт Національного фонду досліджень України 2020.02/0015 “Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля – атмосфера – іоносфера” (2020–2021 рр.) (виконавець напрямку).

3. Академічна стипендія Кабінету Міністрів України (2025–2026 н.р.).

4. Особистий внесок дисертанта в отриманих наукових результатах та їхня новизна.

Усі наукові публікації написано у співавторстві. Особистий внесок здобувачки полягає у зборі та обробці значного масиву даних геомагнітних спостережень мережі INTERMAGNET, аналізі часових рядів X -, Y - та Z -компонент геомагнітного поля, проведенні спектрального, вейвлет- та статистичного аналізу, виконанні розрахунків параметрів геомагнітних збурень, інтерпретації отриманих результатів та встановленні фізичних механізмів досліджуваних ефектів. Здобувачка брала безпосередню участь у підготовці текстів наукових статей, тез доповідей, обговоренні результатів досліджень та формулюванні висновків.

Результати роботи апробовано на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях і представлені здобувачкою особисто.

1. Вперше у глобальних масштабах детально досліджено часову еволюцію рівня флуктуацій геомагнітного поля з виділенням характерних параметрів збурень і встановлено зв'язок між змінами рівня флуктуацій і динамікою геомагнітних збурень під час дії низки потужних джерел енерговиділення (СЗ, геомагнітних бур, землетрусу, вибуху супервулкану).

Встановлено амплітуди збурень: 1–10 нТл (квазіперіодичні) та 30–60 нТл (аперіодичні), а також зростання флуктуацій під час бур у 20–28 разів.

Отримано нові результати щодо спектрально-часових особливостей флуктуацій геомагнітного поля.

2. Виконано комплексне дослідження геомагнітних ефектів сонячних затемнень 10 червня 2021 р., 25 жовтня 2022 р., 14 жовтня 2023 р. та 8 квітня 2024 р. за даними мережі геомагнітних обсерваторій INTERMAGNET. Встановлено існування аперіодичного та квазіперіодичного геомагнітних ефектів затемнення. Показано, що затемнення супроводжувалися переважно зменшенням рівня X -компоненти геомагнітного поля від 1 до 30 нТл внаслідок зниження концентрації електронів у динамо-області іоносфери та послаблення іоносферних струмів. Підтверджено залежність амплітуди геомагнітного ефекту

від максимальної фази затемнення, площі покриття сонячного диска, локального часу та географічного положення станції спостереження. Виявлено посилення короткоперіодичних флуктуацій геомагнітного поля з періодами від 5 до 120 хв та амплітудами до 10 нТл, що пов'язано з генерацією атмосферних гравітаційних хвиль. За допомогою спектрального аналізу визначено характерні періоди квазіперіодичних збурень близько 20, 35 та 60 хв і встановлено особливості часової еволюції геомагнітної реакції на затемнення за різних геліогеофізичних умов.

3. Вперше отримано статистичні характеристики магнітних бур впродовж 24-го циклу сонячної активності, де індекси досягали: $D_{st} \approx -50 \dots -70$ нТл, $K_p \approx 5-6$, AE значно підвищувався.

4. Вперше детально досліджено особливості розвитку помірних магнітних бур нового, 25-го циклу сонячної активності з урахуванням їх багатостадійного характеру.

Виявлено п'ятикрокову структуру бурі 4–7 листопада 2023 р. (G1–G2–G3–G2–G1), з потужністю 26–103 ТВт та енергією 0.34–2.2 ЕДж.

5. Виконано кількісну енергетичну оцінку складових бурі з визначенням їх параметрів (геокозмічної бурі: 26–103 ТВт, 0.34–2.2 ЕДж; магнітосферної бурі: 0.44–8.2 ПДж; та магнітної бурі: 1.3–8.6 ПДж).

6. Отримано нові результати щодо геомагнітних ефектів землетрусів та вулканічних вибухів у середньо- та короткоперіодному діапазонах, підтверджено хвильову природу цих збурень та їх вплив на іоносферні струми і концентрацію електронів.

7. Розроблено методику виділення хвиль різної фізичної природи та уточнено умови прояву геомагнітної реакції за різних рівнів фонові активності. Отримані дані розширюють експериментальні докази існування сейсмо- та вулканічно-іоносферно-магнітосферних зв'язків і підвищують розуміння взаємодії підсистем геокосмосу під дією імпульсних джерел енергії (затримка реакції:

~6 хв та 97–106 хв; АГХ-періоди: 7–14 хв; МГД-швидкості: ~1.5–4 км/с; амплітуда збурень: 1–10 нТл, аперіодичні 30–60 нТл; відносне збурення електронної концентрації: ≈5.3%).

5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації Голуб. М. Ю. забезпечується використанням значного масиву експериментальних даних мережі геомагнітних обсерваторій INTERMAGNET, а також застосуванням сучасних методів аналізу часових рядів геомагнітного поля. Для обробки та аналізу даних використовувалися методи математичної статистики, системний спектральний аналіз, вейвлет-перетворення Морле та аналітичні оцінки параметрів геомагнітних збурень. Інтерпретація результатів базувалася на сучасних уявленнях про процеси в системі «Сонце – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля», теорії іоносферного динамо та хвильових процесів у геокосмічному середовищі.

Достовірність отриманих результатів підтверджується їх узгодженням із відомими теоретичними положеннями та результатами інших досліджень геомагнітних ефектів сонячних затемнень, магнітних бур, землетрусів і вулканічних вивержень. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у фахових наукових виданнях та виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus, а також апробовані на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях. Висновки дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими та достовірними.

6. Наукове, теоретичне та практичне значення результатів дисертації.

Результати дисертації мають важливе наукове та прикладне значення, оскільки геомагнітне поле є одним із ключових індикаторів процесів у системі «Сонце – магнітосфера – іоносфера – атмосфера – Земля». Часові варіації геомагнітного поля відображають реакцію навколоземного середовища на

впливи як космічного походження (сонячні затемнення, магнітні бурі), так і літосферного походження (землетруси, вулканічні виверження). Вивчення таких варіацій дозволяє поглибити розуміння механізмів взаємодії між геосферами Землі, особливостей перенесення енергії в геокосмічному середовищі та закономірностей формування геомагнітних збурень.

У дисертаційній роботі отримано кількісні характеристики часових і спектральних параметрів флуктуацій геомагнітного поля для різних типів природних збурень, встановлено особливості їх часової еволюції та визначено характерні часові масштаби процесів. Отримані результати можуть бути використані для моніторингу стану геомагнітосфери та іоносфери Землі, удосконалення методів аналізу геомагнітних даних, розвитку моделей космічної погоди та оцінювання впливу геомагнітних збурень на системи енергопостачання, радіозв'язку, радіонавігації й інші технічні системи. Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено в науково-дослідну діяльність кафедри космічної радіофізики та використано при виконанні науково-дослідних робіт.

7. Повнота викладення матеріалів дисертації в роботах, опублікованих автором.

Матеріали дисертації опубліковані у 17 наукових працях, серед яких 7 статей у наукових фахових виданнях України (6 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus), 2 – праці в зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях (входять до наукометричної бази Scopus), 8 – матеріали доповідей на міжнародних конференціях.

Наукові праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Наукові праці у наукових фахових виданнях України:

1. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Бухтоподібні варіації геомагнітного поля, що супроводжували катастрофічний вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р.

Кінематика і фізика небесних тіл. 2023. Т. 39, №5. С. 3–23. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591323050033>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Розрахунок основних параметрів іоносферних збурень. Участь у фізичній інтерпретації отриманих результатів, написання окремих розділів.

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та основних результатів, їхній аналіз. Розробка математичної моделі.)

2. Черногор Л. Ф., **Голуб М. Ю.** Геомагнітний ефект сонячного затемнення 25 жовтня 2022 р. в Євразійському регіоні. Кінематика і фізика небесних тіл. 2024. Т. 40, № 3. С. 3–25. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324030024>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Написання окремих розділів, участь в обговоренні результатів.

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Написання окремих розділів, обговорення та заключних висновків.)

3. Черногор Л. Ф., **Голуб М. Ю.** Помірні магнітні бурі 28 квітня – 2 травня 2023 р. Кінематика і фізика небесних тіл. 2024. Т. 40, № 6. С. 19–44. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324060023>.

(Особистий внесок здобувача: Збір експериментальних даних. Обробка експериментальних даних. Опис стану космічної погоди. Написання окремих розділів. Аналіз часових варіацій. Участь у фізичному тлумаченні отриманих результатів.

Особистий внесок Черногора Л.Ф.: Постановка задачі. Фізичне тлумачення. Написання обговорення та основних результатів.)

Наукові праці в наукових виданнях, які індексуються в наукометричній базі SCOPUS:

4. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Bay-Shaped Variations in the Geomagnetic Field that Accompanied the Catastrophic Explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2023. Vol. 39, No. 5. P. 247–260. DOI: <https://doi.org/S0884591323050033>.

5. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Geomagnetic Effect of the Solar Eclipse of October 25, 2022, in Eurasia. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. Vol. 40, No. 3. P. 117–137. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324030024>.

6. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.**, Rozumenko V. T. Main Features of the Geomagnetic Effect of the October 14, 2023 Annular Solar Eclipse over the Americas. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2024. Vol. 265. P. 106354. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106354>.

7. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Moderate Magnetic Storms on April 28–May 2, 2023. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2024. Vol. 40, No. 6. P. 306–326. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591324060023>.

8. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Geomagnetic effect of the solar eclipse of April 8, 2024, in the North American sector. *Advances in Space Research*. 2025. Vol. 75, Iss. 3. P. 3133–3149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.002>.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Bay-shaped variations in the geomagnetic field that accompanied the catastrophic explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Astronomy and Space Physics in the Kyiv University*. May 23–26, 2023. Kyiv, Ukraine. P. 102–103.

2. Chernogor L. F., **Holub M. Yu.** Large-scale geomagnetic field disturbances caused by the strong explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *APHYS* 2023. October 17–21, 2023. Kyiv, Ukraine. P. 87–88.

3. Chernogor L. F., Holub M. Yu. Geomagnetic effect of the October 25, 2022 partial solar eclipse in the Euro-Asian regio. Astronomy and Space Physics in the Kyiv University. May 28–31, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 81–83.

4. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Rozumenko V. T. Global variations of the geomagnetic effect during the October 14, 2023 annular solar eclipse in the Americas. APHYS 2024. October 22–25, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 262–263.

5. Chernogor L. F., Holub M. Yu. Features of the geomagnetic effect caused by the solar eclipse on April 8, 2024 in the American region. APHYS 2024. October 22–25, 2024. Kyiv, Ukraine. P. 256–257.

6. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Yhang Yu. Features of the multi-step geomagnetic storm on November 4–7, 2023: observation results at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky Station. XII International Antarctic Conference. May 13–14, 2025. Kyiv, Ukraine. P. 68.

7. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Zheng Yu. Features of the multi-step geomagnetic storm on November 4–7, 2023: observation results at the Ukrainian Antarctic station Akademik Vernadsky. Astronomy and Space Physics in Kyiv University. May 27–30, 2025. Kyiv, Ukraine. P. 95–96.

8. Chernogor L. F., Holub M. Yu., Rozumenko V. T. The multi-step geomagnetic storm of November 4–7, 2023, as a topic of applied physics. Proceedings of the XXI International scientific conference electronics and applied physics. APHYS 2025. October, 21–24, 2025, Kyiv, Ukraine. P. 111–112.

8. Дотримання академічної доброчесності.

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу оригінальності (перевірки наявності тестових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що виявлені в роботі запозичення, є правомірними, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

9. Апробація результатів дисертації.

Представлені в роботі результати доповідалися на 3 міжнародних конференціях:

– Astronomy and Space Physics in the Kyiv University (Kyiv, Ukraine, 18–21 October 2022; 23–26 May 2023, 28–31 May 2023).

– XVIII International Conference “Electronics and Applied Physics” (APHYS) (Kyiv, Ukraine, 18–22 October 2022; 17–21 October 2023).

– Astronomy and Space Physics in the Kyiv University (Kyiv, Ukraine, 18–21 October 2022; 23–26 May 2023, 28–31 May 2024).

10. Оцінка структури, мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступний для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам відповідно постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 21.03.2022 року № 341), Наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки України від 31.05.2019 року № 759).

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності, за якою вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значущістю дисертаційна робота Голуб М. Ю. «Часові варіації рівня флуктуацій

геомагнітного поля» повністю відповідає спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

12. Результати обговорення та проведення презентації. Рекомендація дисертації до захисту.

Здобувач представила основні результати досліджень своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (Витяг з протоколу № 13 від 16 червня 2026 року) у формі презентації та наукової дискусії після її завершення. Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, а також актуальність теми роботи, наукову новизну результатів, їхнє наукове і практичне значення, на розширеному засіданні кафедри було одностайно ухвалене рішення про рекомендацію дисертації Голуб М. Ю. «Часові варіації рівня флуктуацій геомагнітного поля» до захисту в спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

Головуючий,

доктор фіз.-мат. наук, професор,

професор кафедри теоретичної радіофізики



Сергій ШУЛЬГА