

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РЕЗНИЧЕНКО МАРИНА ОЛЕКСІЇВНА

УДК 550.388.2

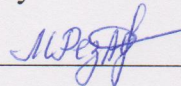
ДИСЕРТАЦІЯ
ПРОЯВИ СЛАБКИХ ВАРІАЦІЙ КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ
В СИСТЕМІ ІОНОСФЕРА-ПЛАЗМОСФЕРА:
РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

104 – Фізика та астрономія

10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 М. О. Резниченко

Ідентичність за змістом Науковий керівник
з першим прізвищем Котов Дмитро Володимирович,
дисертації засвідчую кандидат фізико-математичних наук, доцент
Вчений секретар ХНТУ «ХПТ»
проф. Закобєрковий О. О.

13. 12. 2021 р.

Харків - 2021



АНОТАЦІЯ

Резниченко М.О. Прояви слабких варіацій космічної погоди в системі іоносфера-плазмосфера: результати спостережень та моделювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія (Галузь знань 10 – Природничі науки). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків, 2021.

Об'єкт дослідження – геокосмічна плазма та процеси в ній в діапазоні висот 200–7000 км.

Предмет дослідження – варіації в системі іоносфера-плазмосфера, викликані впливом слабких збурень космічної погоди, та фізичні механізми, відповідальні за ці варіації.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню впливу слабких змін космічної погоди на систему іоносфера-плазмосфера за допомогою мультиінструментальних досліджень та моделювання фізичних процесів.

Методи дослідження. Спостереження стану іоносфери в періоди слабких змін космічної погоди виконані методами некогерентного розсіяння (НР) та вертикального зондування іоносфери (ВЗІ). Для аналізу результатів спостережень використовувалися методи математичної статистики та статистичної радіофізики. Дослідження фізичних механізмів, відповідальних за спостережувані зміни в системі іоносфера-плазмосфера, виконувалися за допомогою фізичного моделювання системи іоносфера-плазмосфера. Особливістю методики моделювання є використання результатів іоносферних спостережень у якості вхідних параметрів для фізичної моделі Field Line Interhemispheric Plasma (FLIP). Така методика досліджень є унікальною, оскільки дозволяє уникнути значних невизначеностей у вхідних параметрах фізичної моделі, що притаманні більшості інших теоретичних досліджень через низьку точність емпіричних моделей термосфери й іоносфери, що зазвичай використовуються як джерело вхідних даних для фізичного моделювання. Валідація змодельованих варіацій параметрів

плазмового середовища проводилася шляхом порівняння з даними спостережень міжнародних іоносферних і плазмосферних супутникових місій.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у наступному:

- вперше продемонстровано, що навіть слабкі варіації космічної погоди здатні призводити до значної перебудови взаємодії в системі іоносфера-плазмосфера, викликаючи, зокрема, сильну модуляцію іоносферно-плазмосферних потоків іонів водню (H^+);

- за допомогою фізичного моделювання встановлено механізми, відповідальні за зміни у взаємодії іоносфери та плазмосфери. Головними причинами змін є вертикальний рух іоносфери або часткове спустошення плазмосфери;

- встановлено, що найбільш чутливим до слабких змін космічної погоди параметром іоносферної плазми є відносна концентрація іонів водню H^+ . Ця знахідка дозволила пояснити багаторічну проблему низьких прогностичних можливостей моделі іонного складу зовнішньої іоносфери міжнародного емпіричного стандарту International Reference Ionosphere.

Практична значимість дисертації полягає у наступному. Нові дані та знання про реакцію системи іоносфера-плазмосфера на слабкі зміни космічної погоди сприятимуть поглибленню розуміння впливу Сонця на навколоземний космічний простір та дозволять просунутися у розв'язанні актуальних проблем прогнозування космічної погоди та корегування моделей навколоземного плазмового середовища задля достовірного прогнозування негативного впливу іоносфери та плазмосфери на рух та функціонування космічних апаратів, супутникових систем зв'язку, радіолокації та глобального позиціонування.

У *вступі* обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, описано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено відомості стосовно апробації роботи і публікацій результатів досліджень.

Перший розділ має оглядовий характер. В ньому представлено огляд сучасних уявлень про сонячно-земні зв'язки та основні фізичні механізми, що визначають космічну погоду, наведено опис процесу збурення геомагнітного поля та класифікацію геокоосмічних бур за геомагнітними індексами, описано загальну структуру іоносфери та плазмосфери Землі та розглянуто основні драйвери збурень в іоносфері та плазмосфері. Окремо представлено аналіз сучасного стану досліджень навколоземного космічного середовища, методів та засобів його діагностики (дистанційних радіофізичних та супутникових), а також сучасних моделей іоносфери та плазмосфери. Обґрунтовано вибір проблематики досліджень, необхідність і актуальність вирішення завдань дисертаційної роботи.

У *другому розділі* представлено результати аналізу часових варіацій параметрів плазмового оточення Землі, отриманих за допомогою радара некогерентного розсіяння Інституту іоносфери до, під час та після слабких варіацій космічної погоди в різні сезони на різних фазах циклу сонячної активності (23-го та 24-го). Виконано порівняльний аналіз результатів спостережень відносного вмісту іонів водню з оцінками міжнародної моделі іонного складу IRI-2016/TBT-2015.

Отримано наступні результати:

- виявлено, що для більшості досліджуваних періодів слабкі варіації космічної погоди не призводять до істотних змін у варіаціях концентрації електронів в області максимуму іонізації іоносфери та зовнішній іоносфері; виключенням є період у грудні 2017 р., для якого концентрація плазми у нічні години після слабого геомагнітного збурення зменшилася удвічі;
- виявлено, що протягом усіх досліджених періодів, що супроводжувалися слабкими змінами космічної погоди, не відбувалося істотних змін у варіаціях температур електронів; це свідчить про відсутність значного посилення кільцевого струму, який міг би вплинути на варіації концентрації електронів в області F2 та у зовнішній іоносфері;
- знайдено, що, на противагу іншим параметрам плазми, відносна концентрація іонів водню у зовнішній іоносфері значно змінювалася під час

слабких збурень космічної погоди. Відносна концентрація іонів водню може змінюватися до 2–3 разів навіть при дуже слабкому посиленні геомагнітної активності ($K_p \leq 3$), причому посилення геомагнітної активності призводить до зменшення $N(H^+)/N$, а послаблення – до збільшення;

- виявлено, що найкраща узгодженість між результатами спостережень та модельними оцінками відносного вмісту іонів H^+ має місце при посиленій геомагнітній активності; розбіжності збільшуються зі зменшенням магнітної активності.

Третій розділ присвячений моделюванню фізичних процесів в системі іоносфера-плазмосфера, в тому числі з використанням даних радара НР Інституту іоносфери. Отримано наступні результати:

- продемонстровано, що навіть слабкі варіації космічної погоди здатні призводити до значної перебудови взаємодії в системі іоносфера – плазмосфера. Ця перебудова відбувається внаслідок значної модуляції іоносферно-плазмосферних потоків іонів водню;

- встановлено ключові фізичні механізми, відповідальні за зміни у взаємодії іоносфери та плазмосфери, та зв'язок цих механізмів зі слабкими варіаціями космічної погоди. Головними причинами змін вертикального руху плазми, що спричиняє модуляцію потоків іонів водню під час збурень космічної погоди, можуть бути два головних фактора: посилення горизонтальних термосферних вітрів, спрямованих до екватору вночі (внаслідок розігріву авроральних зон), та проникнення зональних магнітосферних електричних полів в середні широти;

- проведено валідацію змодельованих варіацій параметрів іоносфери та плазмосфери шляхом порівняння з даними спостережень за допомогою радара НР, а також міжнародних іоносферних і плазмосферних супутникових місій;

- пояснено головні причини значних відмінностей між спостережуваними варіаціями $N(H^+)/N$ та прогнозами моделі іонного складу IRI-2016/TBT-2015 в спокійних геомагнітних умовах;

- проведено дослідження варіацій іоносферної плазми в двох віддалених регіонах Північної півкулі – європейському (Харків, Україна) та азійському

(Шигаракі, Японія). Встановлено, що різна реакція іоносфери на слабкі варіації космічної погоди над Центральноєвропейським та азійським регіонами може бути пояснена ефектом місцевого часу. Результати проведеного моделювання узгоджуються з даними іоносферних (Swarm) і плазмосферних (DMSP) супутникових місій.

Ключові слова: космічна погода, система іоносфера-плазмосфера, іони водню, іоносферно-плазмосферні потоки іонів, модуляція потоків, радар некогерентного розсіяння, моделювання.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Kotov D. V., Richards P. G., Truhlík V., Bogomaz O. V., **Shulha M. O.**, Maruyama N., Hairston M., Miyoshi Y., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Matsuoka A., Shinohara I., Hernández-Pajares M., Domnin I. F., Zhivolup T. G., Emelyanov L. Ya., Chepurnyy Ya. M. Coincident observations by the Kharkiv IS radar and ionosonde, DMSP and Arase (ERG) satellites, and FLIP model simulations: implications for the NRLMSISE-00 hydrogen density, plasmasphere, and ionosphere. *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. P. 8062–8071. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL079206> (Scopus, Q1 згідно з Scimago Ranking).
2. Kotov D. V., Richards P. G., Truhlík V., Maruyama N., Fedrizzi M., **Shulha M. O.**, Bogomaz O. V., Lichtenberger J., Hernández-Pajares M., Chernogor L.F., Emelyanov L. Ya, Zhivolup T. G., Chepurnyy Ya. M., Domnin I. F. Weak Magnetic storms can modulate ionosphere-plasmasphere interaction significantly: mechanisms and manifestations at mid-latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. Vol.124. P. 9665-9675. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JA027076>. (Scopus, Q1 згідно з Scimago Ranking).
3. Panasenko S. V., Kotov D. V., Otsuka Y., Yamamoto M., Hashiguchi H., Richards P. G., Truhlik V., Bogomaz O. V., **Shulha M. O.**, Zhivolup T. G.,

Domnin I. F. Coupled investigations of ionosphere variations over European and Japanese regions: Observations, comparative analysis, and validation of models and facilities. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2021. Vol.8, No. 45. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00441-8> (Scopus, Q1 згідно з Scimago Ranking).

4. Шульга М. А., Котов Д. В., Богомаз А. В. Исследование реакции концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы на слабую геомагнитную бурю 24 декабря 2017 г. в разных широтах Европейского региона. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Радіофізика та іоносфера. Харків: НТУ ХПІ, 2018. №43(1319). С. 18–23. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43386> (дата обращения: 20.09.2020). (WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. Kotov D., Truhlík V., Richards P., Podolská K., Bogomaz O., Chernogor L., Siusiuk M., **Shulha M.**, Domnin I. Upper transition height at European mid-latitudes for the years of 2010 and 2016: surprising changes. *EGU General Assembly 2017* (Vienna, Austria, 23 – 28 April, 2017). Geophysical Research Abstracts. Vol. 19, EGU2017-7760. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-7760.pdf> (last accessed: 17.11.2017)

6. Kotov D. V., Truhlík V., Richards P., Burešová D., **Shulha M. O.**, Bogomaz O.V., Chernogor L. F., Domnin I. F. Dramatic variations in electron temperature at European mid-latitudes caused by the severe storm of September 7 – 8, 2017 observations by Kharkiv IS radar and comparison with FLIP and IRI/TBT-2012 models. *EGU General Assembly 2018* (Vienna, Austria, 8 –13 April, 2018). Geophysical Research Abstracts. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..2014316K/abstract> (last accessed: 20.10.2018)

7. Truhlik V., Bilitza D., Richards P., Kotov D., Podolská K., Trísková L., **Shulha M.** Improving the electron and ion temperature models in IRI. *COSPAR 2018 42-nd Assembly* (Pasadena, California, 14 – 22 July, 2018). Abstract ID: 42E3432T.

URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018cosp...42E3432T/abstract> (last accessed: 10.08.2018).

8. **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Bogomaz O. V., Zhivolup T. G., Koloskov A.V., Lisachenko V. M., Hairston M. Multi-instrumental and modeling investigation of ionospheric response to weak geomagnetic storm of 21-23 March 2017 over the Ukrainian Antarctic station and magnetically conjugate region. *IX International Antarctic Conference 2019*: book of abstracts (Kyiv, 14-16 May, 2019). Kyiv, 2019. P.185.

9. Kotov D. V., Panasenko S. V., Richards P. G., **Shulha M. O.**, Bogomaz O. V., Aksonova K. D., Truhlik V., Yamamoto M., Hashiguchi H., Otsuka Y. Modulation of ionosphere-plasmasphere interaction by weak magnetic storms: Mid-latitude effects in European and Japanese longitudinal sectors. *Beacon Satellite Symposium 2019*: abstract (Olztynie, Poland, 19-23 August, 2019). URL: <http://bss2019.uwm.edu.pl/sites/default/files/uploads/kotovetal.pdf> (last accessed: 11.12.2019).

10. **Shulha M.**, Kotov D., Truhlik V., Richards P., Bogomaz O. Propositions on improvement of the topside ion composition model in IRI for low solar activity conditions. *International Reference Ionosphere Workshop 2019* (Nicosia, Cyprus, 2 - 13 September 2019). URL: <http://iri2019.frederick.ac.cy/docs/Program2-COSPAR-IRI-2019-final7.pdf> (last accessed: 15.01.2020).

11. Truhlik V., Bilitza D., Richards P. G., Kotov D. V., Triskova L., **Shulha M. O.** New empirical models of the ion temperature and ion composition. *AGU Fall Meeting* (USA, San Francisco, 9 – 13 December 2019). Abstract ID: SA21B-3102. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFMSA21B3102T/abstract> (last accessed: 20.01.2020).

12. **Шульга М. А.**, Котов Д. В., Богомаз А. В. Исследование влияния слабой геомагнитной бури 24 декабря 2017 г. на концентрацию электронов в максимуме слоя F2 ионосферы в разных широтах Европейского региона. *XIII Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів: матеріали конференції* (м. Харків, 19–22 листопада 2019 р.). Харків, 2019. С. 540

URL: http://web.kpi.kharkov.ua/masters/wp-content/uploads/sites/135/2019/12/zbirnik-tez_2019.pdf (дата звернення: 12.02.2020).

13. Kotov D., Richards P., Bogomaz O., **Shulha M.**, Maruyama N., Fedrizzi M., Truhlík V., Lichtenberger J., Hernández-Pajares M., Miyoshi Y., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Shoji M., Matsuoka A., Shinohara I., Zhivolup T., Emelyanov L., Chepurnyy Y., Domnin I. Unusually high thermospheric hydrogen density prior to severe storm of September 8, 2017 and its impact on the storm manifestations. *EGU General Assembly 2020* (Vienna, Austria, 4 – 8 May, 2020). Geophysical Research Abstracts. Vol. 19, EGU2020-6925. URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-6925> (last accessed: 15.09.2020).

14. **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Bogomaz O. V., Zhivolup T. G., Koloskov O. V., Zalizovski A. V., Lisachenko V. M., Reznichenko A. I. Seasonal effects in variations of electron density over the Ukrainian Antarctic station: results of observations and modeling. *X International Antarctic Conference 2021: book of abstracts* (Kyiv, 11-13 May, 2021). Kyiv, 2021. P.78. URL: <http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Abstracts-X-IAC-2021.pdf> (дата звернення: 12.09.2021).

15. **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Bogomaz O. V., Zhivolup T. G., Koloskov O. V., Zalizovski A. V., Lisachenko V. M., Reznichenko A. I. Results of ionosphere-plasmasphere system investigation in the American and European longitudinal sectors for 2020. *X International Antarctic Conference 2021: book of abstracts* (Kyiv, 11-13 May, 2021). Kyiv, 2021. P. 79. URL: <http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Abstracts-X-IAC-2021.pdf> (дата звернення: 12.06.2021).

16. **Шульга М. О.**, Котов Д. В., Богомаз О. В., Резниченко А. І. Мультиінструментальні дослідження реакції іоносфери на слабку геомагнітну бурю 28–30 жовтня 2008 р. в європейсько-африканському довготному секторі. *XXIX Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD—2021): збірник тез доповідей*. Ч. III. Харків: Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. (м. Харків, 18–20 травня 2021 р.). Харків, 2021. С. 260. URL:

http://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Tezi_dopovidey_MicroCAD-2021_chastina_3.pdf (дата звернення: 30.06.2021).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

17. **Shulha M.**, Aksonova K., Shnitsar I., Pulyayev V. Calculation of the height-time dependence of the electron density of the ionospheric plasma under instability of the incoherent scatter radar constant. *IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2018. P. 544–547. DOI:10.1109/ELNANO.2018.8477544.

18. Bogomaz O. V., **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Zhivolup T. G., Koloskov A. V., Zalizovski A. V., Kashcheyev S. B., Reznichenko A. I., Hairston M. R., Truhlik V. Ionosphere over Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station under minima of solar and magnetic activities, and daily insolation: case study for June 2019. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2019. №2(19). DOI: [https://doi.org/10.33275/1727-7485.2\(19\).2019.154](https://doi.org/10.33275/1727-7485.2(19).2019.154)

19. **Шульга М. О.**, Богомаз О. В., Котов Д. В., Живолуп Т. Г., Колосков О. В., Залізівський А. В., Лисаченко В. М. Дослідження іоносфери над Антарктидою у періоди зі спокійною космічною погодою: результати вертикального зондування іоносфери 14–24 вересня 2020 р. *Фізика атмосфери та геокосмосу*. 2020. №1(1). С. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.47774/phag.01.01.2020-4>

20. Bogomaz O., **Shulha M.**, Kotov D., Koloskov A., Zalizovski A. An artificial neural network for analysis of ionograms obtained by ionosonde at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2020. № 2(59). P.67. DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2020.653> ISSN 1727-7485.

21. Розрахунок статистичних характеристик сигналу некогерентного розсіяння: монографія / Пуляєв В. О., Рогожкін Є. В., Ємельянов Л. Я., Богомаз О. В., Кацко С. В., **Шульга М. О.** Харків: ТОВ “ПЛАНЕТА-ПРИНТ”, 2021. 236 с.

***Шульга/Shulha** – прізвище здобувача до вступу в шлюб.

ABSTRACT

Reznychenko M.O. Manifestations of weak space weather variations in the ionosphere-plasmasphere system: results of observations and simulations. – Qualification scholarly paper: a manuscript.

Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Natural Sciences, Speciality – 104 Physics and Astronomy. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The object of the study is geospace plasma and processes in it in the range of altitudes of 200-7000 km.

The subject of the study is variations in the ionosphere-plasmasphere system caused by the effect of weak space weather disturbances and the physical mechanisms responsible for these variations.

The thesis is devoted to study the effect of weak space weather changes on the ionosphere-plasmasphere system using multi-instrumental research and modeling of physical processes.

Research methods. Observations of the ionosphere during periods of weak space weather changes were carried out by remote radiophysical methods of incoherent scatter (IS) and vertical sounding of the ionosphere. Methods of mathematical statistics and statistical radiophysics were used to analyze the results of observations. Experimental data were processed using original software developed at the Institute of Ionosphere (upgraded UPRISE software package). Investigations of the physical mechanisms responsible for the observed changes in the ionosphere-plasmasphere system were performed using physical modeling. A feature of the modeling method is using of ionospheric observations as input parameters for the physical model Field Line Interhemispheric Plasma (FLIP). This research method is unique because it avoids the significant uncertainties in the input parameters of the physical that are common to most other theoretical studies due to the low accuracy of empirical models of the thermosphere and ionosphere commonly used as a source of input for physical modeling. Validation of the simulated variations of plasma environment parameters was

carried out by comparing with the observational data of international ionospheric and plasmaspheric satellite missions.

The scientific novelty of the dissertation is as follows:

- for the first time demonstrated that even weak variations of space weather lead to significant rearrangement interaction in the ionosphere-plasmasphere system, causing, in particular, strong modulation of ionospheric-plasmospheric fluxes of hydrogen ions (H^+);
- the mechanisms responsible for changes in the interaction of the ionosphere and plasmasphere have been established using physical modeling. The main reasons of changes are vertical motion of the ionosphere or partial depletion of the plasmasphere;
- it is established that the most sensitive parameter of ionospheric plasma to weak space weather changes is the relative concentration of hydrogen ions H^+ . This finding allowed us to explain the long-standing problem of low predictive capabilities of the topside ion composition model of the international empirical standard International Reference Ionosphere.

The practical significance of the results is as follows.

New data and knowledge about the response of the ionosphere-plasmasphere system to weak space weather changes will contribute to deepening the understanding of the impact of the Sun on the near-Earth space and allow us to advance in solving actual problems of space weather forecasting and adjusting models of the near-Earth plasma environment to reliably predict the negative impact of the ionosphere and plasmasphere on the motion and operation of spacecraft, satellite communications, radar and global positioning.

The *introduction* substantiates the relevance of the dissertation, formulates the purpose and objectives of the study, defines the object, subject and methods of research, shows the relationship of work with scientific topics, describes the scientific novelty and practical significance of the results, indicates the personal contribution of the author, provides information about approbation of work and publication of research results.

The *first chapter* provides overview of modern ideas about solar-terrestrial relations and the main physical mechanisms that determine space weather, describes the

process of geomagnetic field perturbation and classification of geomagnetic storms by geomagnetic indices, describes the general structure of the Earth's ionosphere and plasmasphere and considers the main drivers of perturbations in the ionosphere and plasmasphere. The analysis of the current state of near-Earth space environment research, methods and techniques of its diagnostics (remote radiophysical and satellites) as well as current models of the ionosphere and plasmasphere are presented separately. The choice of research problems, necessity and relevance for solving the problems of dissertation are substantiated.

The *second chapter* presents the results of analysis of temporal variations of the Earth's plasma environment parameters obtained by incoherent scatter radar of the Institute of Ionosphere before, during and after weak variations in space weather for different seasons at different phases of the solar cycle (23-rd and 24-th). Comparative analysis of the results of observations of the relative concentration of hydrogen ions with estimates of international ion composition model IRI-2016/TBT-2015 was carried out.

The main results of *second chapter* are as follows.

- it was revealed that for most of the studied periods weak variations in space weather do not lead to significant changes in electron density variations both in the F2 layer peak region and topside ionosphere; the exception is December 2017 when the plasma density decreased by twice after weak geomagnetic disturbance during nighttime;
- it was found that during all the investigated periods accompanied by weak space weather changes there were not significant variations in the electron temperature; this indicates the absence of significant increase of the ring current, which could affect variations in the F2 layer peak electron density and the topside ionosphere;
- it was found that the relative concentration of hydrogen ions in the topside ionosphere changed significantly during weak space weather disturbances in contrast to other plasma parameters. The relative concentration of hydrogen ions can change up to 2-3 times even with a very weak increase in geomagnetic activity ($K_p \leq 3$). Moreover increase in geomagnetic activity leads to decrease in $N(H^+)/N$ while weakening to increase;

- it was revealed that the best agreement between the results of observations and model estimates of the relative concentration of H^+ ions occurs with increase in geomagnetic activity; differences increase with decrease of magnetic activity.

The *third chapter* is devoted to modeling of physical processes in the ionosphere-plasmasphere system using Kharkiv incoherent scatter radar data. The following results were obtained:

- it is demonstrated that even weak variations of space weather lead to significant reorganization of the interaction in the ionosphere - plasmasphere system. This rearrangement occurs due to strong modulation of ionospheric-plasmospheric fluxes of hydrogen ions;

- the key physical mechanisms responsible for changes in the interaction of the ionosphere and plasmasphere and connection of these mechanisms with weak variations of space weather are established. The main reasons of changes in the vertical motion of plasma, which causes modulation of hydrogen ion fluxes during space weather disturbances may be two factors: enhancement of horizontal thermospheric winds directed to the equator during nighttime (due to heating of auroral zones) and penetration of zonal magnetospheric electric fields to middle latitudes;

- validation of the simulated variations of plasma environment parameters was carried out by comparing with IS radar and international ionospheric and plasmaspheric satellite missions data;

- the main reasons of significant differences between observed variations of $N(H^+)/N$ and predictions of the ion composition model IRI-2016/TBT-2015 in quiet geomagnetic conditions are explained;

- multi-instrumental studies of ionospheric plasma variations in two distant regions of the Northern Hemisphere – European (Kharkiv, Ukraine) and Asian (Shigaraki, Japan) was carried out. It is established that different reaction of the ionosphere to weak space weather changes over the Central Europe and Asian region can be explained by the local time effect. The simulation results are consistent with data from ionospheric (Swarm) and plasmaspheric (DMSP) satellite missions.

Key words: space weather, ionosphere-plasmasphere system, hydrogen ions, ionosphere-plasmasphere fluxes of ions, modulation of fluxes, incoherent scatter radar, modeling.

LIST OF PUBLICATIONS ON THE SUBJECT OF THE THESIS

Scientific papers, in which the main scientific results of the thesis are published:

1. Kotov D. V., Richards P. G., Truhlík V., Bogomaz O. V., **Shulha M. O.**, Maruyama N., Hairston M., Miyoshi Y., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Matsuoka A., Shinohara I., Hernández-Pajares M., Domnin I. F., Zhivolup T. G., Emelyanov L. Ya., Chepurnyy Ya. M. Coincident observations by the Kharkiv IS radar and ionosonde, DMSP and Arase (ERG) satellites, and FLIP model simulations: implications for the NRLMSISE-00 hydrogen density, plasmasphere, and ionosphere. *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45. P. 8062–8071. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL079206>. (Scopus, Q1 according to Scimago Ranking).
2. Kotov D. V., Richards P. G., Truhlík V., Maruyama N., Fedrizzi M., **Shulha M. O.**, Bogomaz O. V., Lichtenberger J., Hernández-Pajares M., Chernogor L.F., Emelyanov L. Ya, Zhivolup T. G., Chepurnyy Ya. M., Domnin I. F. Weak magnetic storms can modulate ionosphere-plasmasphere interaction significantly: mechanisms and manifestations at mid-latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. Vol.124. P. 9665-9675. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JA027076>. (Scopus, Q1 according to Scimago Ranking).
3. Panasenko S. V., Kotov D. V., Otsuka Y., Yamamoto M., Hashiguchi H., Richards P. G., Truhlik V., Bogomaz O. V., **Shulha M. O.**, Zhivolup T. G., Domnin I. F. Coupled investigations of ionosphere variations over European and Japanese regions: Observations, comparative analysis, and validation of models and facilities. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2021. Vol.8, No. 45. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00441-8> (Scopus, Q1 according to Scimago Ranking).
4. **Shulha M. A.**, Kotov D. V., Bogomaz A. V. Issledovanie reaktsii kontsentratsii elektronov v maksimume sloya F2 ionosfery na slabuyu geomagnitnuyu

buryu 24 dekabrya 2017 g. v raznykh shirotakh Evropeyskogo regiona [Investigation of the ionospheric F2 layer electron density peak reaction to weak geomagnetic storm of December 24, 2017 for different latitudes of the European region]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Seriya: Radiofizyka ta ionosfera* [Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Radiophysic and ionosphere]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. №.43 (1319). S.18-23. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/43386> (last accessed: 20.09.2020) (WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

Published works of approbation nature:

5. Kotov D., Truhlík V., Richards P., Podolská K., Bogomaz O., Chernogor L. Siusiuk M., **Shulha M.**, Domnin I. Upper transition height at European mid-latitudes for the years of 2010 and 2016: surprising changes. *EGU General Assembly 2017* (Vienna, Austria, 23 – 28 April, 2017). Geophysical Research Abstracts. Vol. 19, EGU2017-7760. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-7760.pdf> (last accessed: 20.09.2020).

6. Kotov D. V., Truhlík V., Richards P., Burešová D., **Shulha M. O.**, Bogomaz O.V., Chernogor L. F., Domnin I. F. Dramatic variations in electron temperature at European mid-latitudes caused by the severe storm of September 7 – 8, 2017 observations by Kharkiv IS radar and comparison with FLIP and IRI/TBT–2012 models. *EGU General Assembly 2018* (Vienna, Austria, 8 –13 April, 2018). Geophysical Research Abstracts. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018EGUGA..2014316K/abstract> (last accessed: 20.10.2018).

7. Truhlik V., Bilitza D., Richards P., Kotov D., Podolská K., Třísková L., **Shulha M.** Improving the electron and ion temperature models in IRI. *COSPAR 2018 42-nd Assembly* (Pasadena, California, 14 – 22 July, 2018). Abstract ID: 42E3432T. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018cosp...42E3432T/abstract> (last accessed: 10.08.2018).

8. **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Bogomaz O. V., Zhivolup T. G., Koloskov A.V., Lisachenko V. M., Hairston M. Multi-instrumental and modeling investigation of

ionospheric response to weak geomagnetic storm of 21-23 March 2017 over the Ukrainian Antarctic station and magnetically conjugate region. *IX International Antarctic Conference 2019*: book of abstracts (Kyiv, 14-16 May, 2019). Kyiv, 2019. P.185.

9. Kotov D. V., Panasenko S. V., Richards P. G., **Shulha M. O.**, Bogomaz O. V., Aksonova K. D., Truhlik V., Yamamoto M., Hashiguchi H., Otsuka Y. Modulation of ionosphere-plasmasphere interaction by weak magnetic storms: Mid-latitude effects in European and Japanese longitudinal sectors. *Beacon Satellite Symposium 2019*: abstract (Olztynie, Poland, 19-23 August, 2019). URL: <http://bss2019.uwm.edu.pl/sites/default/files/uploads/kotovetal.pdf> (last accessed: 11.12.2019)

10. **Shulha M.**, Kotov D., Truhlik V., Richards P., Bogomaz O. Propositions on improvement of the topside ion composition model in IRI for low solar activity conditions. *International Reference Ionosphere Workshop 2019* (Nicosia, Cyprus, 2 - 13 September 2019). URL: <http://iri2019.frederick.ac.cy/docs/Program2-COSPAR-IRI-2019-final7.pdf> (last accessed: 15.01.2020).

11. Truhlik V., Bilitza D., Richards P. G, Kotov D. V, Triskova L., **Shulha M. O.** New empirical models of the ion temperature and ion composition. *AGU Fall Meeting* (USA, San Francisco, 9 – 13 December 2019). Abstract ID: SA21B-3102. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFMSA21B3102T/abstract> (last accessed: 20.01.2020).

12. **Shulha M. A.**, Kotov D. V., Bogomaz A. V. Issledovanie vliyaniya slaboy geomagnitnoy buri 24 dekabrya 2017 g. na kontsentratsiyu elektronov v maksimume sloya F2 ionosfery v raznykh shirotakh Evropeyskogo regiona [Investigation of the weak geomagnetic storm effect of December 24, 2017 on the F2 layer peak electron density for different latitudes of the European region]. *XIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia mahistrantiv ta aspirantiv*: materialy konferentsii (m. Kharkiv, 19–22 lystopada 2019 r.) Kharkiv, 2019. S. 540 URL: http://web.kpi.kharkov.ua/masters/wp-content/uploads/sites/135/2019/12/zbirnik-tez_2019.pdf (last accessed: 12.02.2020).

13. Kotov D., Richards P., Bogomaz O., **Shulha M.**, Maruyama N., Fedrizzi M., Truhlik V., Lichtenberger J., Hernández-Pajares M., Miyoshi Y.,

Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Shoji M., Matsuoka A., Shinohara I., Zhivolup T., Emelyanov L., Chepurnyy Y., Domnin I. Unusually high thermospheric hydrogen density prior to severe storm of September 8, 2017 and its impact on the storm manifestations. *EGU General Assembly 2020* (Vienna, Austria, 4 – 8 May, 2020). Geophysical Research Abstracts. Vol. 19, EGU2020-6925. URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-6925> (last accessed: 15.09.2020).

14. **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Bogomaz O. V., Zhivolup T. G., Koloskov O. V., Zalizovski A. V., Lisachenko V. M., Reznichenko A. I. Seasonal effects in variations of electron density over the Ukrainian Antarctic station: results of observations and modeling. *X International Antarctic Conference 2021: book of abstracts* (Kyiv, 11-13 May, 2021). Kyiv, 2021. P.78. URL: <http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Abstracts-X-IAC-2021.pdf> (last accessed: 12.09.2021).

15. **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Bogomaz O. V., Zhivolup T. G., Koloskov O. V., Zalizovski A. V., Lisachenko V. M., Reznichenko A. I. Results of ionosphere-plasmasphere system investigation in the American and European longitudinal sectors for 2020. *X International Antarctic Conference 2021: book of abstracts* (Kyiv, 11-13 May, 2021). Kyiv, 2021. P. 79. URL: <http://uac.gov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Abstracts-X-IAC-2021.pdf> (last accessed: 12.09.2021).

16. **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Bogomaz O. V., Reznichenko A. I. Multyinstrumentalni doslidzhennia reaktsii ionosfery na slabku heomahnitnu buriu 28–30 zhovtnia 2008 r. v yevropeisko-afrykanskomu dovhotnomu sektori [Multi-instrumental studies of the ionosphere response to a weak geomagnetic storm on October 28-30, 2008 in the European-African longitudinal sector]. *XXIX Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorov'ia» (MicroCAD—2021): zbirnyk tez dopovidei*. Ch. III. (m. Kharkiv, 18–20 travnia 2021 r.). Kharkiv: NTU «KhPi», 2021. S. 260. URL: http://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2021/05/Tezi_dopovidey_MicroCAD-2021_chastina_3.pdf (last accessed: 30.06.2021).

Published works that additionally reflect the scientific results of the thesis:

17. **Shulha M.**, Aksonova K., Shnitsar I., Pulyayev V. Calculation of the height-time dependence of the electron density of the ionospheric plasma under instability of the incoherent scatter radar constant. *IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2018. P. 544–547. DOI:10.1109/ELNANO.2018.8477544.
18. Bogomaz O. V., **Shulha M. O.**, Kotov D. V., Zhivolup T. G., Koloskov A. V., Zalizovski A. V., Kashcheyev S. B., Reznichenko A. I., Hairston M. R., Truhlik V. Ionosphere over Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station under minima of solar and magnetic activities, and daily insolation: case study for June 2019. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2019. №2(19). DOI: [https://doi.org/10.33275/1727-7485.2\(19\).2019.154](https://doi.org/10.33275/1727-7485.2(19).2019.154)
19. **Shulha M. O.**, Bogomaz O. V., Kotov D. V., Zhivolup T. G., Koloskov A. V., Zalizovski A. V., Lisachenko V. M. Doslidzhennia ionosfery nad Antarktydoiu u periody zi spokiinoiu kosmichnoiu pohodoiu: rezultaty vertykalnoho zonduvannia ionosfery 14–24 veresnia 2020 r [Investigation of the ionosphere over Antarctica under quiet space weather conditions: results of vertical sounding of the ionosphere in September 14-24, 2020]. *Fizyka atmosfery ta heokosmosu* [Physics of atmosphere and geospace]. 2020. №1(1). S. 45–55. DOI: <https://doi.org/10.47774/phag.01.01.2020-4>
20. Bogomaz O., **Shulha M.**, Kotov D., Koloskov A., Zalizovski A. An artificial neural network for analysis of ionograms obtained by ionosonde at the Ukrainian Antarctic Akademik Vernadsky station. *Ukrainian Antarctic Journal*. 2020. № 2(59). P. 67. DOI: <https://doi.org/10.33275/1727-7485.2.2020.653> ISSN 1727-7485.
21. Rozrakhunok statystychnykh kharakterystyk syhnalu nekoherentnoho rozsiannia: monohrafiia / Pulyaev V. O., Rohozhkin Y. V., Yemelyanov L. Ya., Bogomaz O. V., Katsko S. V., Shulha M. O. Kharkiv: TOV “PLANETA-PRINT”, 2021. 236 s.

* **Shulha** – the applicant's last name before marriage

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	11
1.1 Сонце як джерело космічної погоди.....	11
1.1.1 Сонячний вітер	11
1.1.2 Сонячні плями та сонячний цикл	12
1.1.3 Сонячні спалахи	13
1.1.4 Корональні викиди маси, високошвидкісні потоки плазми та високоенергетичні частинки сонячного походження	14
1.2 Магнітосфера як зона трансформації в навколоземну космічну погоду	15
1.2.1 Структура магнітосфери Землі	15
1.2.2 Динаміка магнітосфери Землі під час збурень космічної погоди. Геомагнітні індекси та класифікація інтенсивності геокосмічних бур.....	17
1.2.3 Генерація впливів параметрів сонячного вітру на систему іоносфера- плазмосфера.....	19
1.3 Система іоносфера-плазмосфера та збурення в ній	20
1.3.1 Іоносфера та плазмосфера.....	20
1.3.2 Основні фактори збурень іоносфери та плазмосфери	23
1.4 Інструменти дослідження системи іоносфера-плазмосфера	25
1.4.1 Дистанційні засоби діагностики стану іоносфери Землі	25
1.4.2 Супутникові засоби спостережень	27
1.4.3 Моделі іоносфери та плазмосфери.....	28
1. 5 Невирішені задачі.....	30
1.6 Висновки до розділу 1	32
РОЗДІЛ 2 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ СЛАБКИХ ВАРІАЦІЙ КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ НА СИСТЕМУ ІОНОСФЕРА- ПЛАЗМОСФЕРА.....	33
2.1 Стан космічної погоди для досліджуваних періодів	34
2.1.1 Стан космічної погоди 28–30 жовтня 2004 р.	34
2.1.2 Стан космічної погоди 22–25 вересня 2016 р.	36
2.1.3 Стан космічної погоди 23–27 вересня 2012 р.	38

2.1.4 Стан космічної погоди 21–26 вересня 2013 р.	38
2.1.5 Стан космічної погоди 21–26 грудня 2017 р.	40
2.1.6 Стан космічної погоди 1–6 вересня 2017 р.	42
2.2 Варіації концентрації електронів та висоти максимуму області F2 іоносфери.	44
2.3 Варіації температур електронів та іонів	48
2.4 Варіації іонного складу зовнішньої іоносфери.....	49
2.5 Порівняльний аналіз результатів спостережень варіацій іонів водню з даними моделі іонного складу TBT-15.....	55
2.6 Висновки до розділу 2	57
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМІ ІОНОСФЕРА-ПЛАЗМОСФЕРА.....	58
3.1 Особливості моделювання	58
3.2 Вплив варіацій космічної погоди на систему іоносфера-плазмосфера через зміни стану іоносфери	59
3.3 Вплив варіацій космічної погоди на систему іоносфера-плазмосфера через зміни стану плазмосфери	73
3.4 Рекомендації щодо покращення прогностичних можливостей моделі іонного складу в International Reference Ionosphere.....	84
3.5 Регіональні відмінності варіацій у системі іоносфера-плазмосфера внаслідок впливу слабого збурення космічної погоди 5–6 вересня 2017 р.....	86
3.6 Висновки до розділу 3	92
ВИСНОВКИ.....	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	97
ДОДАТКИ.....	115