

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-04>

УДК 550.34:550.510.533

ПРОЯВ ГЛОБАЛЬНОЇ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ В АТМОСФЕРІ ТА ІОНОСФЕРІ

І. Г. Захаров, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: giz-zig@ukr.net

Надійшла до редакції 1 жовтня 2020 р.

Актуальність. В останні десятиліття сформувалися уявлення про землетруси (ЗТ) як про фінальну стадію загальнопланетарного безперервного самоорганізованого процесу з періодами накопичення і релаксації тектонічних напруг. Однак, в науковій літературі, як і раніше, представлені дослідження відгуку атмосферних та іоносферних процесів на окремі сильні ЗТ. У цій роботі вперше розглянуто взаємозв'язок процесів у літосфері, тропосфері та іоносфері з урахуванням нових уявлень про сейсмічний процес на тлі процесів, зумовлених космічною погодою, що є новим кроком у вивченні середовища проживання людини.

Мета роботи – пошук взаємозв'язків у системі Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера у планетарному масштабі при зміні глобальної сейсмічної активності (ГСА).

Матеріали та методи. Дослідження проведені з використанням чотирьох баз щоденних даних за 2007 – 2015 рр. про космічну погоду і магнітосферу (індекси сонячної і геомагнітної активності), іоносферу (критична частота області F2 у західному і східному півкулях – f_0F2 ; глобальний повний електронний вміст іоносфери – ПЕВ), приземну атмосферу (атмосферний тиск) та літосферу (максимальна за добу амплітуда ЗТ). Використано метод накладених епох та інші статистичні методи аналізу.

Результати. Встановлено квазісинхронні зміни магнітосферних, іоносферних й тропосферних характеристик у періоди різкого посилення ГСА. Часто вони мають циклічний пилкоподібний характер від одного сейсмічно активного періоду до іншого, що вказує на можливість безперервної взаємодії геосфер, а не тільки у періоди збурень. Зокрема, встановлено зростання f_0F2 при різкому посиленні ГСА на величину до 0.5 МГц майже одночасно у східній і західній півкулях.

Висновки. Отримані результати свідчать про можливість тривалої або безперервної взаємодії літосфери з розташованими вище геосферами. Одним із джерел синхронізації можуть виступати зміни космічної погоди. Як можливий механізм появи глобальних ефектів в атмосфері та іоносфері при зміні ГСА запропоновано розглядати роль виходу на поверхню глибинних газів. Цей процес є глобальним і пов'язаний одночасно як з сейсмічністю, так і з параметрами обертання Землі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: літосферно-атмосферно-іоносферна взаємодія, іоносферні та атмосферні збурення.

MANIFESTATION OF GLOBAL SEISMIC ACTIVITY IN THE ATMOSPHERE AND IONOSPHERE

I. G. Zakharov, L. F. Chernogor

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background. In recent decades, the concept of earthquakes (EQ) has been formed as the final stage of a planetary continuous self-organizing process with periods of accumulation and relaxation of tectonic stresses. However, in the scientific literature, as before, studies of the response of atmospheric and ionospheric processes to individual strong EQs are presented. In this work, the coupling of processes in the lithosphere, troposphere and ionosphere is considered for the first time, taking into account new ideas about the seismic process against the background of processes caused by space weather, which is a new step in the study of the human environment.

Objectives of the work is to find relationships in the Earth – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system on a planetary scale with a change in global seismic activity (GSA).

Materials and methods. The studies were carried out using four daily databases for 2007–2015 on space weather and the magnetosphere (solar and geomagnetic activity indices), the ionosphere (f_0F2 is the critical frequency of the F2 region in the western and eastern hemispheres; TEC is the global ionospheric total electron content), the surface atmosphere (atmospheric pressure) and the lithosphere (maximum EQ amplitude per day). The method of superimposed epochs and other statistical methods of analysis were used.

Results. Quasi-synchronous changes in magnetospheric, ionospheric, and tropospheric characteristics have been established during periods of a sharp increase in GSA. They often have a cyclical sawtooth character from one seismically active period to another, which indicates the possibility of continuous interaction of geospheres, and not only during periods of disturbances. In particular, an increase in f_0F2 with a sharp increase in GSA by up to 0.5 MHz was found almost simultaneously in the eastern and western hemispheres.

Conclusions. The results obtained indicate the possibility of long-term or continuous interaction of the lithosphere with the geospheres located above. Space weather changes can be one of the sources of synchronization. As a possible mechanism for the appearance of global effects in the atmosphere and ionosphere when the GSA changes, it

is proposed to consider the role of the release of deep gases to the surface. This process is global and is associated simultaneously with both seismicity and the parameters of the Earth's rotation.

KEY WORDS: lithospheric-atmospheric-ionospheric interaction, ionospheric and atmospheric disturbances.

ПРОЯВЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ

И. Г. Захаров, Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. В последние десятилетия сформировались представления о землетрясениях (ЗТ) как о финальной стадии общепланетарного непрерывного самоорганизующегося процесса с периодами накопления и релаксации тектонических напряжений. Однако, в научной литературе, по-прежнему, представлены исследования отклика атмосферных и ионосферных процессов на отдельные сильные ЗТ. В данной работе впервые рассмотрена взаимосвязь процессов в литосфере, тропосфере и ионосфере с учетом новых представлений о сейсмическом процессе на фоне процессов, обусловленных космической погодой, что является новым шагом в изучении среды обитания человека.

Цель работы – поиск взаимосвязей в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера в планетарном масштабе при изменении глобальной сейсмической активности (ГСА).

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием четырех баз ежедневных данных за 2007–2015 гг. о космической погоде и магнитосфере (индексы солнечной и геомагнитной активности), ионосфере (критическая частота области F2 в западном и восточном полушариях – f_oF2 ; глобальное полное электронное содержание – ПЭС), приземной атмосфере (атмосферное давление) и литосфере (максимальная за сутки амплитуда ЗТ). Использованы метод наложенных эпох и другие статистические методы анализа.

Результаты. Установлены квазисинхронные изменения магнитосферных, ионосферных и тропосферных характеристик в периоды резкого усиления ГСА. Часто они имеют циклический пилообразный характер от одного сейсмически активного периода до другого, что указывает на возможность непрерывного взаимодействия геосфер, а не только в периоды возмущений. В частности, установлено возрастание f_oF2 при резком усилении ГСА на величину до 0.5 МГц почти одновременно в восточном и западном полушариях.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о возможности длительного или непрерывного взаимодействия литосферы с расположенными выше геосферами. Одним из источников синхронизации могут выступать изменения космической погоды. В качестве возможного механизма появления глобальных эффектов в атмосфере и ионосфере при изменении ГСА предложено рассмотреть роль выхода на поверхность глубинных газов. Этот процесс является глобальным и связан одновременно как с сейсмичностью, так и с параметрами вращения Земли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: литосферно-атмосферно-ионосферное взаимодействие, ионосферные и атмосферные возмущения.

ВСТУП

В останні десятиліття виконано велику кількість досліджень впливу землетрусів (ЗТ) та їх провідників на атмосферу та іоносферу (див., наприклад, [1-4]). Розглядають такі основні механізми передачі збурення на іоносферні висоти: збудження й поширення акустико-гравітаційних хвиль від епіцентру ЗТ; модифікація електричних полів і струмів, викликаних електричними процесами в літосфері або в приземній атмосфері. Для досліджень широко використовують навігаційні супутники, що дозволяють контролювати великомасштабні іоносферні процеси (див., наприклад, [3]).

Основна особливість цих досліджень полягає в тому, що автори розглядають відгук атмосфери та іоносфери на окремі сильні ЗТ. У той же час, вже досить давно сформувалися уявлення про ЗТ як про прояв глобального безперервного самоорганізованого процесу з періодами накопичення і релаксації тектонічних напруг [5-7]. Найбільш важливими видаються такі властивості глобальної сейсмічної активності (ГСА) [7]: 1) найбільш сильні ЗТ мають тенденцію групуватися в епохи, протягом яких вони спостерігаються на всій земній кулі; 2) групування ЗТ за величиною їх сейсмічної енергії, що може бути наслідком ієрархічно упорядкованого блокового характеру геофізичного середовища [8]; 3) глобальність сейсмічності тісно пов'язана з глобальним характером процесів у мантиї; 4) вплив на ЗТ процесів в атмосфері, варіацій обертання планети, факторів космічної погоди, місячних припливів.

Очевидно, що глобальний характер сейсмічної активності може зумовити деякі зміни в атмосфері, іоносфері та магнітосфері також глобального масштабу, в тому числі в сейсмічно спокійних регіонах. Така постановка задачі виправдана також тим, що, в світлі сучасних уявлень, Земля та її внутрішні та зовнішні оболонки (система Земля – атмосфера – іоносфера – магнітосфера: ЗАІМ) утворюють єдину відкрити нелінійну динамічну ієрархічну систему, в якій взаємодія між підсистемами можлива, у тому числі, за рахунок енергетично слабких (тригерних) механізмів [9].

Мета роботи – пошук взаємозв'язків у системі ЗАІМ у планетарному масштабі при зміні ГСА.

БАЗА ДАНИХ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Розрахунки проведені для 4 незалежних баз даних (БД): БД1: 01.04.2007 – 31.12.2008, БД2: 01.12.2010 – 31.12.2011, БД3: 14.09.2012 – 15.02.2014, БД4: 01.01.2015 – 31.12.2015, які містили такі щоденні дані.

Космічна погода. Сонячна активність (СА): густина потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$; геомагнітна активність (ГМА): індекс A_p .

Іоносфера. Критична частота області F2 (f_0F2) опівдні за даними іоносферних станцій у східному і західному півкулях: Пругоніце (50.0 °N; 14.6 °E), Хабаровськ (48.5 °N; 135.1° E), Москва (55.5 °N; 37.3 °E), Мілстон Гіл (42.6 °N; 288,5 °E), Боулдер (40.1 °N; 254,8 °E). Повний електронний вміст іоносфери (ПЕВ), усереднений по земній кулі (далі – глобальний ПЕВ) – тільки БД4.

Тропосфера. Приземний атмосферний тиск (P) у пунктах спостереження Харків, Москва, Прага, Мілстон Гіл, Боулдер (у безпосередній близькості до пунктів спостереження іоносфери).

Літосфера. Максимальна за добу магнітуда ЗТ (M_{max}) як індикатор ГСА.

Дані взяті з наступних сайтів: космічна погода – <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices>; іоносфера – ulcar.uml.edu/DIDBase, <http://sec.noaa.gov/Data>, <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>; атмосферний тиск – www.gismeteo.ru, ЗТ – <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>.

Розрахунки проведені методом накладених епох з перевіркою достовірності результатів розрахунків за критерієм Фрідмана [10]. Для наочності на графіках вибірково приведено також стандартну похибку середнього σ . Як нульові дати вибиралися дні різкого збільшення M_{max} після тривалого періоду відносного сейсмічного затишшя, що перевищує час появи провісників згідно [11]: ΔT [роки] = $10^{0.26M - 3.50}$. Розрахунки проведені від -20 -ї до $+10$ -ї діб, фактично від одного сейсмічно активного періоду до наступного. Число розглянутих подій: БД1 – 10, БД2 – 13, БД3 – 12, БД4 – 9, всього 44 події. Результати приймалися до розгляду при рівні значущості $p < 0.1$, додатково їх надійність визначалася зіставленням результатів для незалежних БД.

РЕЗУЛЬТАТИ

У східній півкулі (станція Пругоніце) зміни критичної частоти іоносфери f_0F2 (Рис. 1) демонструють два максимуми з амплітудою 0.5 МГц, приурочені до періодів підвищеної ГСА (нижній графік) поблизу -15 -х і 0 -х діб, після яких величина f_0F2 поступово зменшується. Відповідні зміни сонячної активності були невеликі: згідно [12], зміни іонізуючого ультрафіолетового (УФ) випромінювання Сонця складають 2–3 %. Рівень ГМА також був низьким і не досягав значень, характерних для збурених умов: ($A_p > 27$, або $K_p > 4$). Проте, відзначимо наявність локального максимуму A_p поблизу нульової дати, при цьому відмінність максимального і мінімального значень A_p є достовірним ($p < 0.1$). Як наслідок, незважаючи на малу величину зростання f_0F2 , пояснити його змінами СА і ГМА складно.

Атмосферний тиск P поблизу Пругоніце (східна півкуля) також мав два локальних екстремуми (мінімуми) поблизу періодів посилення ГСА, положення яких дещо випереджає час збільшення f_0F2 в іоносферних даних. Відзначимо, що мінімуми P спостерігався не лише у середньому, але й для всіх 10 розглянутих випадків різкого зростання ГСА (рівень значущості результату становить $p < 0.02$).

У західній півкулі (станція Мілстон Гіл) зміни f_0F2 і P були, в цілому, аналогічні представленим вище, але максимуми показників досягнуто на 1 – 2 доби раніше. Як наслідок, різниця середніх тисків (умовно прийmemo її за різницю тисків між півкулями) напередодні посилення ГМА відчувала стрибок на 10 мм. рт. ст. Такі зміни тиску могли бути зумовлені потоками повітря між півкулями, які вже давно розглядають як один із тригерів ЗТ у деякому сейсмоактивному регіоні [13]. У нашому випадку ми розглядаємо пункти спостереження у сейсмоспокійних регіонах, тому можемо пов'язати цей ефект лише з глобальними сейсмічними явищами. Можна припустити, що глобальна атмосферна циркуляція і ГСА пов'язані між собою. Одним з механізмів їх зв'язку може виступати нерівномірність обертання Землі.

Ще одна важлива особливість отриманих результатів полягає в тому, що ефекти в атмосферних та іоносферних параметрах часто мають вигляд не локальних сплесків поблизу різкого зростання ГСА, а стрибка з подальшим поступовим спаданням (збільшенням) показника до наступного активного періоду (пилкоподібна крива – див. пунктир на Рис. 1).

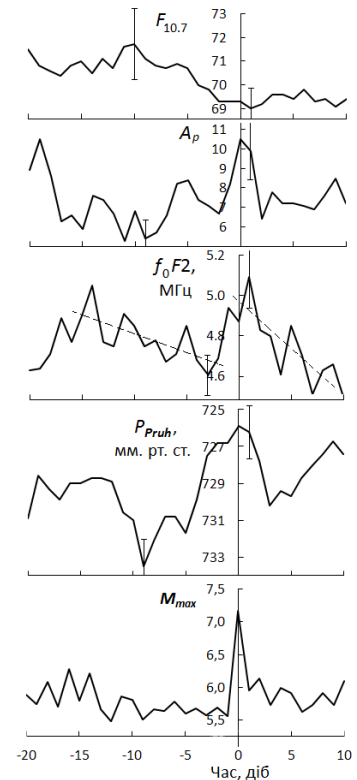


Рис. 1. Варіації f_0F2 і P на ст. Пругоніце, а також СА і ГМА при різкій зміні ГСА (нижній графік).

Відзначимо особливості результатів для інших баз даних. За даними за 2011–2015 рр. (БД2–БД4), максимум f_0F2 поблизу нульової дати присутній у всіх цих БД. Середні зміни f_0F2 по всіх рядах даних і усіх розглянутих станціях представлені на Рис. 2. За даними за 2015 р. зафіксовано також зростання глобального ПЕВ поблизу часу різкого зростання ГСА (Рис. 3, крива 1), яке помітно перевищує зміни, які могли бути викликані сонячною активністю (крива 2: розраховані значення ПЕВ, пропорційні потоку УФ випромінювання Сонця [13]). Відзначимо також схожість змін ПЕВ і f_0F2 (Рис. 2 і 3).

Середні зміни f_0F2 в усіх БД також узгоджуються зі змінами приземного атмосферного тиску P на тій же станції (див. приклад на Рис. 2), що є підтвердженням раніше отриманих результатів [14]. Цей зв'язок більш очевидний в мінімумі СА, і виявляється лише як тенденція на тлі більш сильних варіацій СА і ГМА поблизу максимуму 11-річного сонячного циклу.

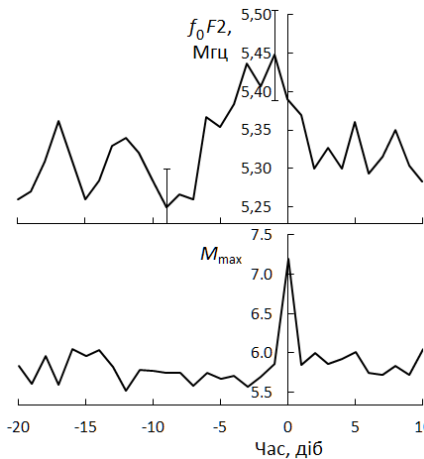


Рис. 2. Середні зміни f_0F2 (БД1–БД4) при різкій зміні ГСА, сумарне $N = 79$.

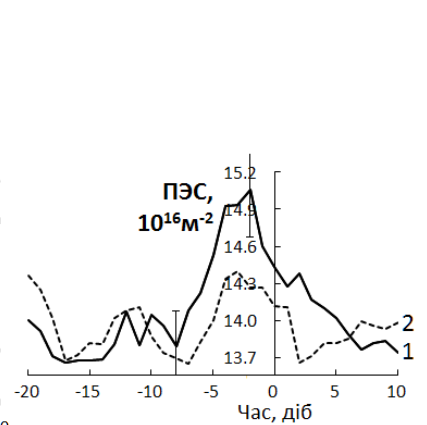


Рис. 3. Середні зміни глобального ПЕВ (БД-4):

1 – експериментальні значення; 2 – розраховані значення за умови, що ПЕВ залежать лише від СА.

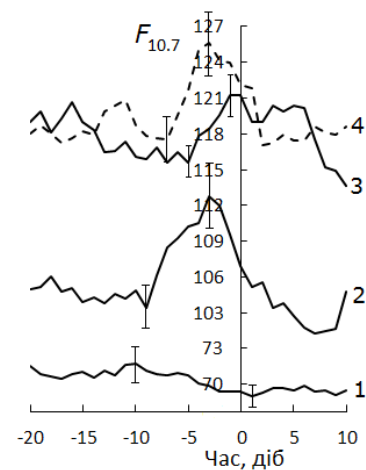


Рис. 4. Зміни СА (індекс $F_{10.7}$) за всі розглянуті періоди: 1 – БД4, 2 – БД3, 3 – БД2, 4 – БД1.

За даними БД2–БД4, що відповідають середньому та високому рівням СА, зміни індексу активності $F_{10.7}$ характеризуються стійким максимумом поблизу різкого зростання ГСА, тоді як за даними БД1 (мінімум СА) вони були невеликі (Рис. 4). Зміни ГМА характеризуються невеликим максимумом поблизу нульової дати (див. приклад на рис. 1), за винятком БД4, що вказує на реальність цього явища (див. також [15]).

Таким чином, ефекти глобальної сейсмічної активності в атмосфері та іоносфері зафіксовані по всіх чотирьох БД, для космічної погоди (індекси сонячної і геомагнітної активностей) наявність характерних змін встановлено за даними 3-х з 4-х БД. Для іоносфери зв'язок з процесами в тропосфері та літосфері більш очевидний в мінімумі 11-річного циклу СА, тоді як при високому рівні СА вплив "знизу" менш помітний. Відзначимо, що ефекти ГСА отримані у сейсмічно спокійних регіонах і незалежно від місця, де відбувалися найбільш сильні ЗТ, тобто зазначені ефекти носили глобальний характер.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Серед розглянутих показників варіації приземного тиску P демонструють найбільш стійкі закономірності при посиленні ГСА. Зокрема, в періоди посилення ГСА у 2013 р. зміни P на ст. Боулдер практично повторювали зміни цього показника на ст. Мілстон Гіл у 2008 р. (Рис. 5). Таким чином, мінімум P , який починає формуватися за 5–9 діб до ЗТ – досить стабільне явище, що охоплює великі території. У західній півкулі мінімум P виражений менше або зміщується на більш ранні дні, збільшуючи різницю тисків між півкулями. Очевидно, що дані окремих станцій не дають повної картини глобальної атмосферної циркуляції, проте, повторюваність ситуації у різні роки вказує на реальність впливу переміщень великих повітряних мас на ініціацію підготовлених ЗТ у глобальному масштабі.

Для іоносфери зв'язок зі змінами ГСА також досить стійкий, але на тлі більш значних варіацій космічної природи. Основні відмінності результатів для окремих іоносферних станцій стосуються деякої відмінності часу появи максимуму f_0F2 поблизу нульової дати у західній і східній півкулях, що можна пов'язати як з особливостями прояву іоносферних збурень на різних геомагнітних широтах, так і впливом на іоносферу процесів у тропосфері, де екстремуми P також не збігаються. І дані про f_0F2 у різних півкулях, і тим більше дані про глобальний ПЕВ вказують на те, що цей ефект носить загальнопланетарний характер і вимагає для свого пояснення інших механізмів, ніж розглядаються в багатьох роботах (див., наприклад, [1-4]).

Отримані результати підтверджують важливу роль СА як одного з тригерів ЗТ (проявляється у 75% від усіх випадків). Наявність локального максимуму ГМА поблизу нульового дня можна пояснити наявністю загального фактору – варіацій параметрів сонячного вітру, що впливають як на геомагнітні, так і на сейсмічні процеси. З одного боку, вони безпосередньо впливають на рівень ГМА, з іншого боку,

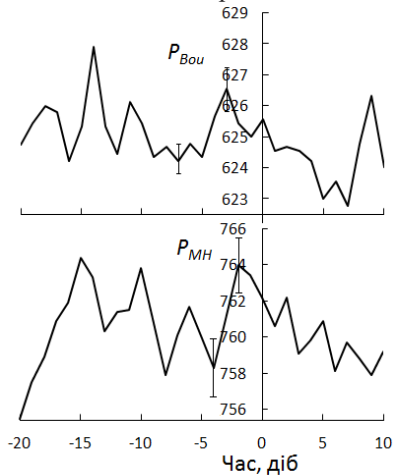


Рис. 5. Порівняння середніх змін приземного атмосферного тиску P на станціях Боулдер (БДЗ) і Мілстон Гіл (БД1) при різкій зміні ГСА.

по ланцюжку сонячний вітер – модуляція галактичних космічних променів – хмарність – циркуляція атмосфери – зміна тиску на земну поверхню під дією переміщення повітряних мас – ініціація підготовлених ЗТ (див., наприклад, [16]) вони можуть впливати на ГСА.

Щоб отримати уявлення про фізичні процеси, відповідальні за варіації ГСА та її ефекти, звернемося до результатів досліджень варіацій природного ДНЧ-випромінювання на межі "земля-повітря", які, як добре відомо, тісно пов'язані з напружено-деформованим станом гірських порід. Зокрема, для періоду часу, який практично збігається з періодом БД1, було показано [17, 18], що варіації ДНЧ-випромінювання у сейсмічно спокійному регіоні (Харківська область, Україна: 49.7 °N; 36.2 °E) від одного сейсмічно активного періоду до наступного мають циклічний пілкоподібний характер, зумовлений, ймовірно, циклічним характером тектонічних процесів. Таким чином, вплив тектонічних процесів поширюється і на сейсмічно спокійний регіон, при цьому зазначений вище пілкоподібний характер змін атмосферних та іоносферних показників виявляється тісно пов'язаним з характером тектонічних процесів. Оскільки всі ефекти зареєстровані у сейсмічно спокійних регіонах, мова йде про глобальні явища.

Механізм появи глобальних ефектів в атмосфері та іоносфері при зміні ГСА можна пов'язати з добре відомим процесом, а саме виходом на земну поверхню із земних надр радону та інших газів. Цей процес зазвичай розглядають як один із складових процесу підготовки та реалізації окремих ЗТ (див., наприклад, [19]). Але, як відомо (див., наприклад, [20, 21]), цей процес носить глобальний характер і відзначається суттєвою неоднорідністю у просторі і часі. Основний потік глибинних газів розвантажується у рифтових зонах серединно-океанічних хребтів, тобто поза прямої залежності від локалізації та магнітуди окремих землетрусів. Можна очікувати, що ці процеси здатні викликати зміни провідності нижніх шарів атмосфери та глобального електричного кола у планетарному масштабі, викликаючи вторинні ефекти.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено зростання критичної частоти області F2 при різкому посиленні ГСА на величину до 0.5 МГц. Ефект проявляється майже одночасно у східному і західному півкулях, а також у значеннях глобального ПЕВ. При цьому в іоносферних варіаціях, як і раніше, простежується вплив як тропосфери (особливо при низькому рівні СА), так і космічної погоди, характеристики якої в 75% випадків також проявляють зв'язок з ГСА. Отже, космічна погода часто, але не завжди може виступати тригером ЗТ. Швидше за все, одночасно реалізується кілька різних зв'язків між геосферами, частково синхронізованих змінами космічної погоди.

2. Встановлено формування мінімуму приземного атмосферного тиску напередодні посилення ГСА, положення якого, швидше за все, зміщується на більш ранні дні перед сильнішими ЗТ. У цілому, в західній півкулі для досліджених періодів мінімум тиску настає раніше, ніж у східному, що призводить до помітного збільшення різниці тисків між півкулями на 10 мм. рт. ст., що можна розглядати як свідчення зв'язку глобальної сейсмічності і глобальної атмосферної циркуляції.

3. Зміни тропосферних та іоносферних показників, як правило, мають циклічний характер у вигляді стрибка поблизу різкого зростання ГСА з подальшим поступовим спаданням (збільшенням) показника до наступного активного періоду (пілкоподібна крива), тобто вплив літосфери на вище розташовані шари є безперервним і тісно пов'язаний з циклічним характером тектонічних процесів.

4. В якості можливого механізму появи глобальних ефектів у атмосфері та іоносфері при зміні ГСА запропоновано розглянути роль виходу на поверхню радону та інших газів. Цей процес є глобальним і нерівномірним у часі, а основний потік глибинних газів розвантажується в рифтових зонах серединно-океанічних хребтів, поза прямої залежності від локалізації і магнітуди землетрусів.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку А.М. Цимбалу за надані дані про повний електронний вміст іоносфери.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

I.G. Zakharov  <http://orcid.org/0000-0002-3262-9984>.

L.F. Chernogor  <http://orcid.org/0000-0001-5777-2392>.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Korepanov V, Hayakawa M, Yampolski Y, Lizunov G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. and Chem. of the Earth*. 2009;34(6-7):485-495.
2. Tanimoto T, Heki K, Artru-Lambin J. *Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. Treatise on Geophysics*. Oxford: Elsevier. 2015;4:421-443.
3. Jin S, Occhipinti G, Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics *Earth-Science Reviews*. 2015;147:54-64.
4. Parrot M, Li M. DEMETER Results related to seismic activity. *Radio Sci. Bul.* 2015;355:18-25.
5. Летников ФА. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 230 с.
6. Горькавый НН, Трапезников ЮА, Фридман АМ. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли. *Докл. РАН. Геофизика*. 1994;338(4):525-527.
7. Викулин АВ, Иванчин АГ. Ротационная модель сейсмического процесса. *Тихоокеанская геология*. 1998;17(6):95-103.
8. Садовский МА, Писаренко ВФ. Сейсмический процесс в блоковой среде. Москва: Наука, 1991. 96 с.
9. Chernogor LF. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. *Int. J. of Rem. Sens.* 2011;32(11):3199–3218.
10. Гнедышев МН, Оль АИ. О методике некоторых гелиобиологических исследований. *Проблемы космической биологии*. Л.: Наука, 1982;43:216-219.
11. Добровольский ИП. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука, 1991. 224 с.
12. Казачевская ТВ, Нусинов АА. Прогностическая модель коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца. *Геоматизм и аэрономия*. 1986;15(2):593-596.
13. Боков ВН. Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений. *Известия РГО РАН*. 2003;135(6):54-65.
14. Zakharov IG, Chernogor LF. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018;58(3):430-437.
15. Тертышников АВ. Оценка практической значимости геомагнитных предвестников сильных землетрясений. *Гелиогеофизические исследования*. 2013;3:63-70.
16. Veretenenko SV, Ogurtsov MG. Nature of long-term correlation between cloud state and variations in galactic cosmic rays flux. *Geomagnetism and aeronomy*. 2015;55(4):442-449.
17. Bogdanov YuA, Zakharov IG. Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity. *Proc. of the 6th Int. Conf.: Problem of Geocosmos. St. Petersburg, Petrodvorets*. 2006. P. 357-360.
18. Zakharov IG. The Influence of Global Seismic Activity on Variations in VLF Emissions and Infrasound in a Seismically Quiet Area. *Proc. of the XVIIth Int. Conf.: Geoinformatics Theoretical and Applied Aspects. – Kyiv, Ukraine, 2018. N13800*. 5 p.
19. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes. *Sensours*. 2007;7(7):1141-1158.
20. Войтов ГИ. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли. Теоретические и региональные проблемы геодинамики. *Тр. Геол. ин-та РАН*. М.: Наука, 1999;515:242-251.
21. Сывороткин ВЛ. Глубинная дегазация и глобальные катастрофы. М.: Геоинформмарк, 2002. 250 с.

REFERENCES

1. Korepanov V, Hayakawa M, Yampolski Y, Lizunov G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. and Chem. of the Earth*. 2009;34(6-7):485-495.
2. Tanimoto T, Heki K, Artru-Lambin J. *Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. Treatise on Geophysics*. Oxford: Elsevier. 2015;4:421-443.
3. Jin S, Occhipinti G, Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics *Earth-Science Reviews*. 2015;147:54-64.
4. Parrot M, Li M. DEMETER Results related to seismic activity. *Radio Sci. Bul.* 2015;355:18-25.
5. Letnikov FA. *Synergetics of geological systems*. Novosibirsk: Science, 1992. 230 p. (Russian).

6. Gorkavyy NN, Trapeznikov YuA, Fridman AM. On the global component of the seismic process and its relationship with the observed features of the Earth's rotation. Dokl. RAS. Geophysics. 1994;338(4):525-527. (Russian).
7. Vikulin AV, Ivanchin AG. Rotational model of the seismic process. Pacific geology. 1998;17(6):95-103. (Russian).
8. Sadosky MA, Pisarenko VF. Seismic process in a block environment. Moscow: Nauka, 1991.96 p. (Russian).
9. Chernogor LF. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. Int. J. of Rem. Sens. 2011;32(11):3199–3218.
10. Gnedyshev MN, Ol AI. On the methodology of some heliobiological studies. Problems of space biology. L. : Nauka, 1982; 43: 216-219. (Russian).
11. Dobrovolskiy IP. Tectonic earthquake preparation theory. Moscow: Nauka, 1991.224 p. (Russian).
12. Kazachevskaya TV, Nusinov AA. Predictive model of short-wave ultraviolet radiation of the Sun. Geomagnetism and Aeronomy. 1986; 15 (2): 593-596. (Russian).
13. Bokov VN. Atmospheric circulation variability - initiator of strong earthquakes. Izvestiya RGS RAS. 2003; 135 (6): 54-65. (Russian).
14. Zakharov IG, Chernogor LF. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. Geomagnetism and Aeronomy. 2018;58(3):430-437.
15. Tertyshnikov AV. Evaluation of the practical importance of geomagnetic precursors of strong earthquakes. Heliogeophysical research. 2013; 3: 63-70. (Russian).
16. Veretenenko SV, Ogurtsov MG. Nature of long-term correlation between cloud state and variations in galactic cosmic rays flux. Geomagnetism and aeronomy. 2015;55(4):442-449.
17. Bogdanov YuA, Zakharov IG. Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity. Proc. of the 6th Int. Conf.: Problem of Geocosmos. St. Petersburg, Petrodvorets. 2006. P. 357-360.
18. Zakharov IG. The Influence of Global Seismic Activity on Variations in VLF Emissions and Infrasound in a Seismically Quiet Area. Proc. of the XVIIth Int. Conf.: Geoinformatics Theoretical and Applied Aspects. – Kyiv, Ukraine, 2018. N13800. 5 p.
19. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes. Sensours. 2007;7(7):1141-1158.
20. Voitov GI. Cold degassing of methane into the Earth's troposphere. Theoretical and regional problems of geodynamics. Tr. Geol. Institute of RAS. Moscow: Nauka, 1999; 515: 242-251. (Russian).
21. Syvorotkin VL. Deep degassing and global disasters. M. : Geoinformmark, 2002.250 p. (Russian).