

<https://doi.org/10.15407/knit2021.05.019>
УДК 550.34:550.510.533

І. Г. ЗАХАРОВ, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук
E-mail: giz-zig@ukr.net

Л. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри, д-р фіз.-мат. наук, проф.
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

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

ВПЛИВ ГЛОБАЛЬНОЇ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ ТА ІОНОСФЕРІ

В останні десятиліття сформувалися уявлення про землетруси (ЗТ) як про прояв фінальної стадії загальнопланетарного неперервного самоорганізованого тектонічного процесу з періодами накопичення та релаксації тектонічних напруг. Однак в науковій літературі, як і раніше, представлено дослідження відгуку атмосферних і 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 як глобальне явище і на фоні процесів, зумовлених космічною погодою. Використано як загальнопланетарні дані (ЗТ, повний електронний вміст ПЕВ іоносфери), так і локальні дані (атмосферний тиск, критична частота шару F2 іоносфери) для широко рознесених пунктів спостережень у західній та східній півкулях. Для підвищення надійності статистичних результатів використано щоденні дані за 2007–2015 роки з чотирьох незалежних банків. Встановлено стійкі ефекти глобальної сейсмічної активності (ГСА) у розглянутих показниках. Так, критична частота шару F2 при різкому посиленні ГСА збільшується на 0.4...0.5 МГц. Цей ефект доволі стійкий і проявляється майже одночасно на іоносферних станціях східної та західної півкуль, а також у планетарних значеннях ПЕВ. При цьому в іоносферних варіаціях, як і раніше, простежується вплив як тропосфери (особливо при низькому рівні сонячної активності), так і космічної погоди, характеристики якої у 75 % випадків також показують зв'язок з ГСА. Отже, космічна погода часто, але не завжди може виступати тригером ЗТ. В цілому у західній півкулі мінімум атмосферного тиску настає раніше, ніж у східному, що призводить до помітного збільшення різниці тисків між півкулями на 10 мм рт. ст., що вказує на зв'язок глобальної сейсмічності та глобальної атмосферної циркуляції. Встановлені ефекти ГСА, як правило, мають характер не локального короткочасного сплеску, а стрибка з подальшим поступовим спаданням (збільшенням) показника до наступного активного періоду (пилкоподібна крива), тобто вплив літосфери на розташовані вище шари є неперервним і носить циклічний характер, зумовлений, ймовірно, циклічним характером тектонічних процесів. Найімовірніше, одночасно реалізуються кілька різних зв'язків між геосферами, частково синхронізованих змінами космічної погоди, які вимагають нових фізичних механізмів для їхнього пояснення.

Ключові слова: сейсмічна активність, тропосферні та іоносферні збурення, метод накладених епох.

ВСТУП

В останні роки відбувається активне вивчення впливу землетрусів (ЗТ), включаючи їхні передвісники, на атмосферу і іоносферу [35, 43]. Розглядаються дві основні групи моделей зв'язку літосфера — атмосфера — іоносфера [36].

1. Передбачається, що в атмосфері над областю ЗТ збуджуються і поширюються акустико-гравітаційні хвилі. На іоносферних висотах вони викликають збурення електричного поля і зміни концентрації заряджених частинок.

2. Передбачається, що іоносферні збурення є наслідком модифікацій електричних полів і

Цитування: Захаров І. Г., Черногор Л. Ф. Вплив глобальної сейсмічної активності на процеси в атмосфері й іоносфері. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 5 (132). С. 19–34. <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.019>

струмів, які викликані електричними процесами в літосфері або у приземній атмосфері.

Характерні просторові масштаби збурень іоносфери напередодні і після ЗТ становлять від 200...300 до кількох тисяч кілометрів, а характерні часові масштаби — від кількох хвилин до кількох діб. Зважаючи на значні відмінності масштабів збурень можна припустити, що літосферно-іоносферні зв'язки зумовлені кількома фізичними механізмами.

Для вивчення літосферно-іоносферних зв'язків широко використовуються навігаційні супутники, що дозволяють контролювати іоносферні процеси в глобальному масштабі [34].

Зазначені вище дослідження мають загальну особливість: у них розглядається відгук атмосфери і іоносфери на окремі сильні ЗТ [33, 39, 41, 46]. Разом з тим вже досить давно сформувався уявлення про ЗТ як про прояв («вершину айсберга») глобального неперервного самоорганізованого тектонічного процесу з періодами накопичення і релаксації тектонічних напружень [4, 8, 11, 22, 23, 25, 40]. Найбільш важливими видаються такі властивості глобальної сейсмічної активності (ГСА) [4].

1. Періодичність: найбільш сильні ЗТ часто мають тенденцію групуватися в епохи, протягом яких вони практично одночасно спостерігаються на всій поверхні Землі і рідко відбуваються в інтервалах часу між ними.

2. Групування ЗТ за величиною їхньої сейсмічної енергії, що призводить до статистично достовірного відхилення від закону повторюваності ЗТ. Ця закономірність може бути наслідком надійно встановленого ієрархічно упорядкованого блокового характеру геофізичного середовища [15]: через те що енергія ЗТ пропорційна об'єму охопленому деформаціями, наявність переважних магнітуд свідчить про переважання блоків певних розмірів. Дана властивість вказує також на те, що літосфера має виражені нелінійні, а також фрактальні властивості.

3. Глобальність сейсмічності тісно пов'язана з глобальним характером процесів у мантиї. Механізмом такого зв'язку виступає взаємний рух тектонічних плит, що призводить до створення зон субдукції — основних осередків ЗТ.

4. Вплив (переважно глобального характеру) на ЗТ земних і космічних процесів: процесів у атмосфері [17, 30], варіацій обертання планети і нутації її полюса [28, 40], факторів космічної погоди [7, 31, 38, 44], місячних припливів [19, 42].

Ці впливи носять складний характер і не завжди підтверджуються іншими дослідниками (про вплив сонячної активності на ЗТ див., наприклад, роботу [37]). Показано [21], що однією з причин неоднозначності результатів у цій області є методологічні неточності досліджень, коли залишається без уваги неоднорідність рядів даних, зумовлена зміною з часом точності і принципів вимірювань різних параметрів природних систем.

Таким чином, сукупність землетрусів, або ГСА, що розглядаються у просторі і часі з урахуванням взаємодії між їхніми осередками, можуть інтерпретуватися як цілком певний фізичний процес [4].

Можна припустити, що глобальний характер сейсмічної активності може зумовити деякі перебудови в атмосфері, іоносфері і магнітосфері також глобального масштабу, зокрема в сейсмічно спокійних регіонах. Для їхньої реєстрації необхідно використовувати досить довгі ряди даних, отриманих одночасно в декількох рознесених пунктах спостережень, щоб відрізнити їх від локальних збурень (поширюється хвиля або локальна аномалія електричних полів), джерелом яких є окремі осередки ЗТ.

Така постановка задачі виправдана також тим, що у світлі сучасних уявлень Земля і її внутрішні та зовнішні оболонки (система Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера: ЗАІМ) утворюють єдину відкриту нелінійну динамічну ієрархічну систему, в якій взаємодія між підсистемами можлива, зокрема, за рахунок енергетично слабких (тригерних) механізмів [12, 14, 29].

З огляду на можливий вплив різних зовнішніх факторів як на сейсмічність (див. п. 4 вище), так і на інші геосфери, не можна виключити можливість встановлення квазисинхронних варіацій параметрів у різних геосферах, зокрема при відсутності прямих причинно-наслідкових зв'язків [48].

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

Нова постановка задачі вимагає певних змін у методології досліджень у порівнянні з звичайно використовуваними. Як правило, аналіз зв'язків літосфера — атмосфера — іоносфера виконують для окремих досить потужних сейсмічних подій без урахування процесів у попередній період. Зокрема, при статистичних дослідженнях беруть до уваги всі ЗТ з магнітудою вище заданої, зазвичай магнітуди від 5 і вище [31]. Очевидно, що з точки зору тектоніки сильний ЗТ після тривалого відносно спокійного періоду і такий же ЗТ після серії інших сильних ЗТ може відповідати істотно різним умовам в літосфері. У першому випадку можна допустити тривале накопичення тектонічних напруг планетарного масштабу, що переривається різким їхнім зниженням і подальшою перебудовою, у другому випадку ЗТ відбувається після вже завершеної перебудови системи тектонічних напруг.

Таким чином, однотипні ситуації в системі ЗАІМ, необхідні для статистичного аналізу, можуть відповідати, перш за все, ізольованим явищам ГСА, що розвиваються на значних часових інтервалах один від одного. Звичайно ж, не можна виключити наявності тривалих циклів ГСА та відповідних їм тривалих періодів підготовки, однак у першому наближенні така умова є виправданою для вирішення поставленого завдання.

БАЗА ДАНИХ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Беручи до уваги, що очікувані ефекти ГСА можуть мати невелику амплітуду і проявлятися на тлі більш значних варіацій іншої природи, в роботі використані чотири бази даних (БД), для кожної з яких розрахунки проведено незалежно. Бази даних охоплюють такі періоди спостережень:

БД1 — 01.04.2007 р. — 31.12.2008 р.,

БД2 — 01.12.2010 р. — 31.12.2011 р.,

БД3 — 14.09.2012 р. — 15.02.2014 р.,

БД4 — 01.01.2015 р. — 31.12.2015 р.

Використано такі щоденні дані.

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

Іоносфера. Критична частота шару F2 (f_oF_2) іоносферних станцій у східній і західній пів-

кулях: Прухоніце (50.0° N; 14.6° E), Хабаровськ (48.5° N; 135.1° E) Москва (55.5° N; 37.3° E), Мілстон Хілл (42.6° N; 288.5° E), Боулдер (40.1° N; 254.8° E) в 00 і 04 (нічні умови), 12 і 16 год LT (денні умови за місцевим часом). Зазвичай використовують дані для 00 і 12 LT; в нашому дослідженні додатково використано дані для 04 і 16 LT, які завдяки інерційності іоносферних процесів краще відображають типові денні та нічні умови в іоносфері, а також дозволяють повніше оцінити мінливість іоносфери протягом дня або ночі. Через пропуски у вимірах або у міжнародних електронних базах даних, для кожної БД використовувалася частина даних, по можливості для західної і східної півкуль одночасно.

Повний електронний вміст іоносфери (ПЕВ), усереднений по земній кулі — тільки БД4.

Тропосфера. Приземний атмосферний тиск P у пунктах спостережень Харків, Москва, Прага, Мілстон Хілл, Боулдер (у безпосередній близькості до пунктів спостереження іоносфери), а також дані для широтного (Москва, Караганда, Хабаровськ, Боулдер) та довготного (Тіксі, Хабаровськ, Ухань, Дарвін) ланцюжків метеорологічних станцій для більш повної оцінки глобальних ефектів.

Літосфера. Кількість ЗТ (N_{eq}) на земній кулі для декількох інтервалів магнітуд, починаючи з $M=4$, і максимальна за добу магнітуда ЗТ (M_{max}) як індикатори ГСА.

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

Розрахунки проведено методом накладених епох (МНЕ) з перевіркою достовірності результатів розрахунків і використанням критерію Фрідмана [3]. За нульові дати вибиралися дні різкого збільшення M_{max} і N_{eq} після тривалого періоду відносного сейсмічного затишшя, що перевищує час появи передвісників згідно з роботою [6]:

$$\Delta T = 10^{0.26M - 3.50} \text{ років}$$

Розрахунки проведено на проміжку часу від -20 до +10 діб, — фактично від одного сейсміч-

но активного періоду до наступного. Кількість подій (випадків різкого збільшення ГСА) становила: БД1 — 10, БД2 — 13, БД3 — 12, БД4 — 9, всього розглянуто 44 події.

Критерій Фрідмана є непараметричним аналогом однофакторного дисперсійного аналізу для повторних вимірювань. Він дозволяє перевіряти гіпотези про подібність більше двох повторних груп вимірювань в умовах невизначеності апіорних передумов про нормальність розподілів і однорідності дисперсій. Статистикою критерію є сума квадратів сум рангів, яка має теоретичний розподіл χ^2 . У нашому випадку, завдяки ранжируванню, критерій дозволяє оцінювати схожість тільки часових змін досліджуваних параметрів поблизу різкої зміни ГСА незалежно від їхніх абсолютних значень, які можуть бути зумовлені іншими факторами. Алгоритм розрахунку критерію Фрідмана у методі МНЕ наведено, зокрема, в роботі [9].

Результати для кожної БД приймалися до розгляду при рівні значущості $p < 0.1$, додатково надійність (повторюваність) результатів визначалася зіставленням результатів розрахунків для незалежних БД. Для наочності на графіках вибірково (для найбільш важливих моментів часу) приведено також стандартну помилку середнього σ .

РЕЗУЛЬТАТИ

Через те що БД1 найбільш повна, розглянемо спочатку відповідний їй період. Зміни максимальної магнітуди та кількості ЗТ з різними магнітудами (вибірково) показані на рис. 1. Видно, що досліджувані інтервали, крім активного періоду після нульової дати, охоплюють спокійний період до нульової дати і період менш істотного попереднього посилення ГСА (від -20 до -14 дб). Максимальна магнітуда і кількість ЗТ з $M > 4.2$ (на рис. 1 як приклад наведено число ЗТ з $M > 5.1$) зменшуються аж до різкого збільшення числа ЗТ в нульовий день. Кількість слабших ЗТ незначно збільшується аж до головного поштовху, потім також поступово зменшується. Таким чином, зміни в часі кількості слабких ЗТ мають особливості, які будуть розглянуті нижче.

Зміни критичної частоти області F2 f_oF2 на станції Прухоніце (рис. 2), не дивлячись на по-

різаність кривої, демонструють два максимуми, віднесених до періодів підвищеної ГСА поблизу -15 -х і 0 -х дб, після яких величина f_oF2 поступово зменшується. Беручи до уваги істотну залежність стану іоносфери від космічної погоди, на рис. 2 приведено також зміни індексів СА і ГМА. Зміни СА невеликі та статистично недостовірні: згідно з даними [10] відповідні зміни іонізаційного УФ-випромінювання Сонця можна оцінити в 2-3 %. Рівень ГМА також був низьким: максимальне значення індексу A_p за всі розглянуті періоди тільки у двох випадках далеко від нульової дати ледь перевищило рівень $A_p = 27$ ($K_p = 4$), який зазвичай розглядають як граничний між суббурними і збуреними умовами. Проте середні зміни A_p , отримані МНЕ, характеризуються локальним максимумом поблизу нульової дати, при цьому відмінність максимального і мінімального значень A_p є достовірною ($p < 0.1$). Як наслідок, незважаючи на малу величину стрибка f_oF2 (не більше ніж 0.5 МГц), пояснити їхніми змінами СА і ГМА неможливо.

Зміни атмосферного тиску P поблизу Прухоніце (пункт спостереження Прага) також демонструють два локальних екстремуми: напередодні посилення ГСА починається зменшення P , яке дещо випереджає стрибок f_oF2 в іоносферних даних. Вражає стійкість цього явища: зменшення P спостерігалось напередодні всіх 10 розглянутих випадків різкого зростання ГСА (рівень значущості результату становить $p < 0.02$), при наявності деяких додаткових особливостей, які ілюструє рис. 3. На рисунку зміни P (розподілених на 3—4 випадки) розділені за рівнем ГСА (максимальної за день магнітуду ЗТ M_{\max} на земній кулі). Рисунок демонструє зниження P за 5...7 дб до різкої зміни рівня ГСА. Однотипна зміна P зберігається до 3...5 дб після нульової дати при наявності стійкого зміщення (показано штриховими лініями на рис. 3) максимумів і мінімумів P на більш ранні доби у міру збільшення M_{\max} . Через те що ЗТ відбувалися у різних частинах земної кулі, наявність таких особливостей є важливим аргументом на користь наявності глобальних ефектів сейсмічної активності.

Зміни f_oF2 на станції Мілстон Хілл (рис. 4) також демонструють два очевидних максимуми-

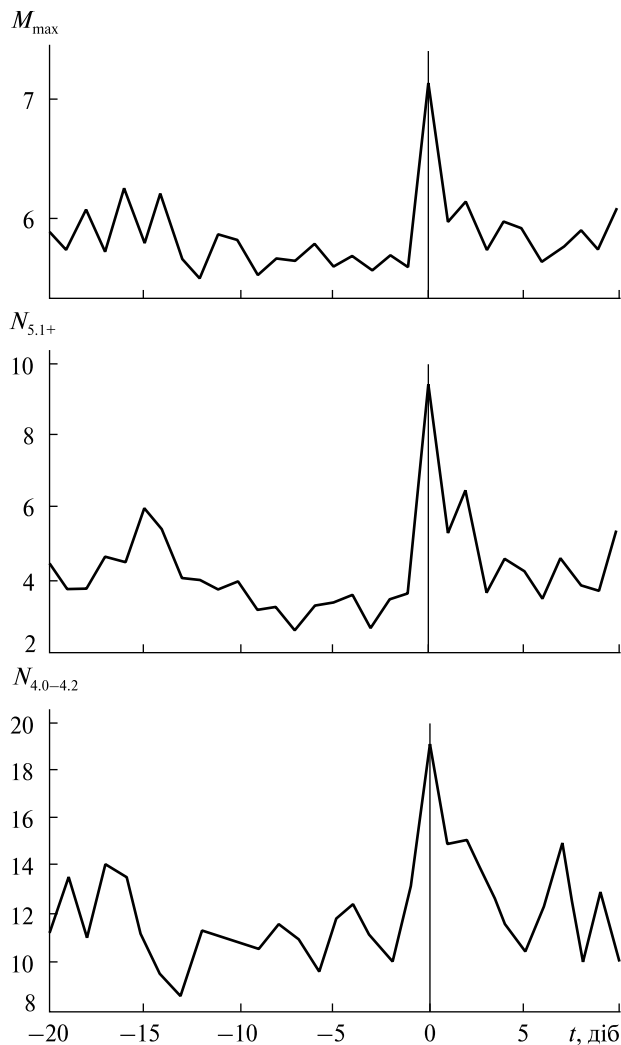


Рис. 1. Середні зміни максимальної магнітуди M_{\max} і кількості землетрусів N_{eq} з $M > 5.1$ і $4.0 \leq M \leq 4.2$ (зверху вниз) для десяти обраних періодів різкого посилення глобальної сейсмічної активності (БД1)

ми, що відповідають періодам підвищеної ГСА, при цьому випередження відносно нульового дня більш очевидне. Незважаючи на порізаність кривих, видно, що зміни f_oF2 на протилежних частинах земної кулі подібні, і в обох випадках не йдуть за змінами СА і ГМА. Основна відмінність даних двох іоносферних станцій полягає у більш ранньому зростанні f_oF2 напередодні нульової дати у Мілстон Хілл, яке змінилося швидким зменшенням f_oF2 , коли значення f_oF2 у Прухоніце ще залишалися високими. Можливо, деяку

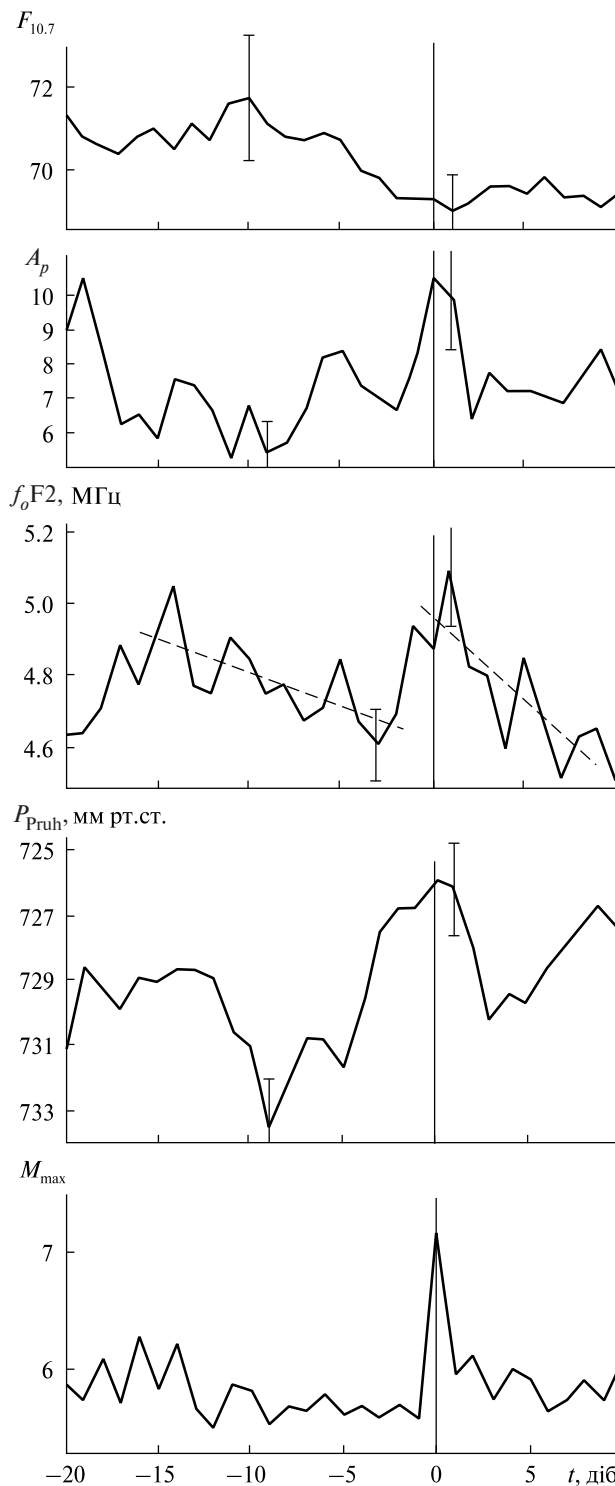


Рис. 2. Варіації f_oF2 на ст. Прухоніце при різкій зміні глобальної сейсмічної активності. Показано фактори впливу на іоносферу «зверху» і «знизу»

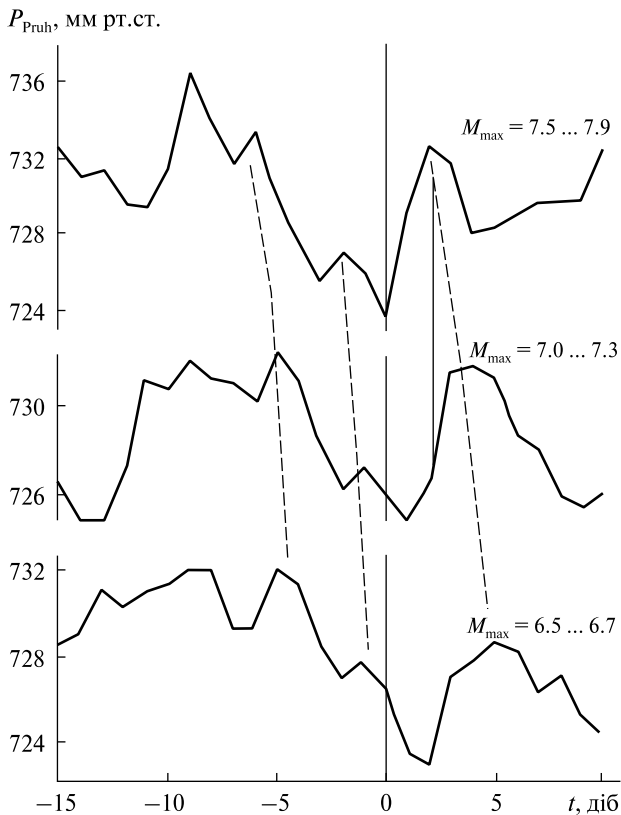


Рис. 3. Варіації атмосферного тиску поблизу ст. Прухоніце (метеорологічна станція Прага) при різних рівнях глобальної сейсмічної активності

роль могли відіграти і зміни ГМА за умови, що у Прухоніце краще проявилася позитивна фаза іоносферної бурі, у Мілстон Хілл — негативна. Однак потрібно враховувати, що рівень ГМА був низьким не тільки в середньому, але і для всіх окремих періодів: поблизу нульової дати максимальне значення $A_p = 21$, що відповідає суббурним умовам.

Середні зміни атмосферного тиску P у Мілстон Хілл (рис. 4) також мають два локальних екстремуми (зокрема, є слабка тенденція до зміщення положення максимуму в залежності від магнітуди ЗТ). Однак положення максимумів P у Мілстон Хілл і Прухоніце помітно різняться, так що різниця середніх тисків (умовно приймемо її за різницю тисків у східній і західній півкулях) напередодні посилення ГМА потерпала стрибок на 10 мм рт. ст. Такі зміни тиску могли бути зумовлені потоками повітря між півкулями,

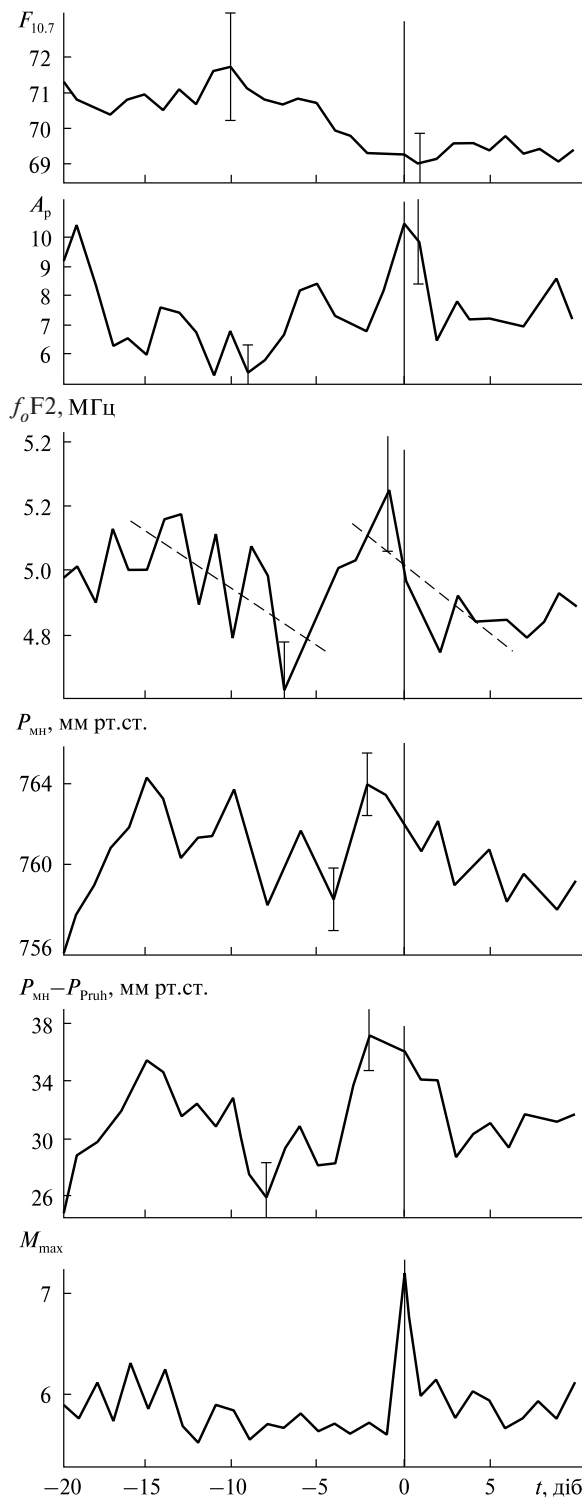


Рис. 4. Варіації f_oF2 на ст. Мілстон Хілл. Показані фактори впливу на іоносферу «знизу», а також різниця середніх значень тиску між півкулями

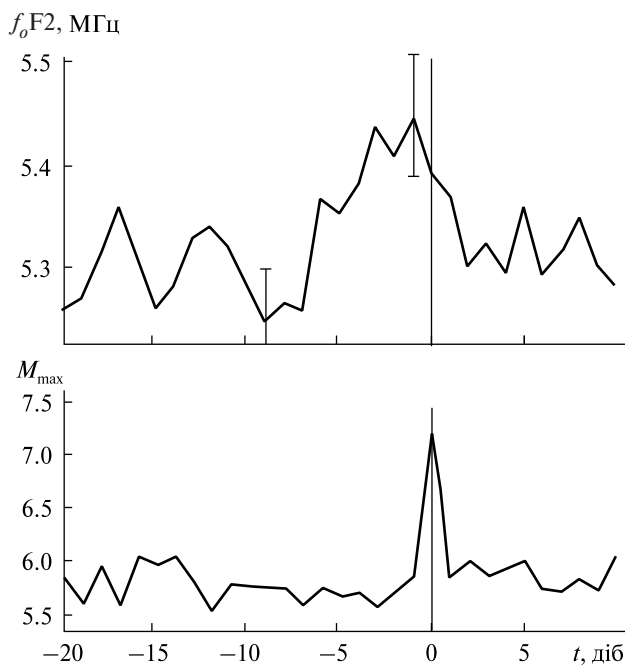


Рис. 5. Середні зміни f_oF2 (БД1-БД4) при різкій зміні глобальної сейсмічної активності, сумарна кількість $N = 79$

які вже давно розглядають як один з тригерів ЗТ у певному сейсмоактивному регіоні [1, 7], проте в даному випадку ми розглядаємо пункти спостережень, розташовані далеко від сейсмоактивних регіонів, і тому пов'язуємо цей ефект з ГСА. Звичайно ж, значення приземного тиску в двох пунктах спостережень не дають повної картини зміни тиску на земній кулі і не дозволяють зробити однозначних висновків, однак можна припустити, що глобальна атмосферна циркуляція і ГСА пов'язані між собою. Одним з механізмів їхнього зв'язку може бути нерівномірність обертання Землі.

Відмітимо також ще одну особливість отриманих результатів: встановлені зміни атмосферних і іоносферних параметрів 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. штрихові лінії на рис. 2 і 4). Можливу природу таких змін буде розглянуто в обговоренні.

За даними за 2011—2015 рр. (БД2 — БД4), максимум критичної частоти f_oF2 шару F2 поблизу

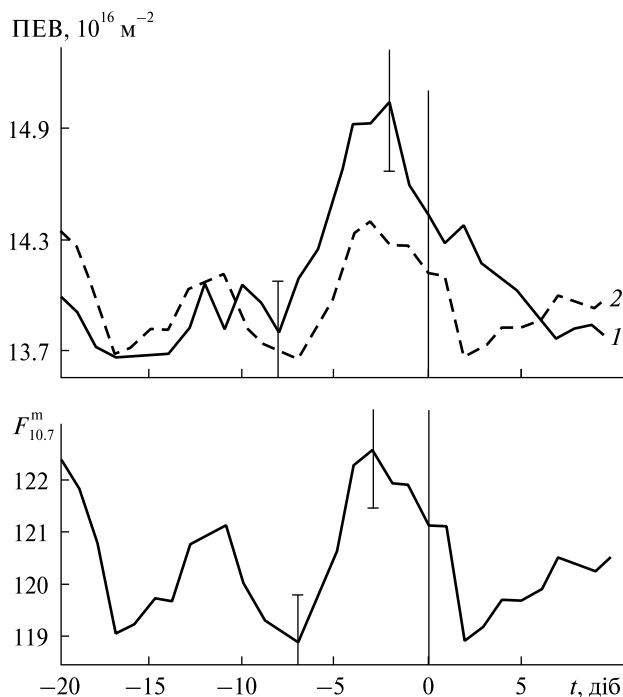


Рис. 6. Середні зміни глобального повного електронного вмісту (2015 р.) і модифікованого індексу при різкій зміні глобальної сейсмічної активності: 1 — експериментальні значення повного електронного вмісту, 2 — розрахункові значення повного електронного вмісту за умови, що він залежить тільки від сонячної активності

нульової дати виявляється у всіх БД. Середні зміни f_oF2 для всіх рядів даних і усіх розглянутих станцій показано на рис. 5.

За даними 2015 р., для якого використовувалися також глобальні карти ПЕВ, обчислено середні по земній кулі зміни ПЕВ поблизу різкого збільшення ГСА (рис. 6). Такі дані якнайкраще підходять для оцінки можливих глобальних ефектів у системі ЗАІМ. Видно, що напередодні нульової дати спостерігається значне збільшення ПЕВ (крива 1), яке помітно перевищує зміни, які могли бути викликані СА (крива 2). Для більшої наочності як оцінку СА на рис. 6 представлено модифікований індекс $F_{10.7}^m$ з урахуванням моделі УФ-випромінювання [10], пропорційний потоку. Відзначимо також схожість змін ПЕВ і середніх змін f_oF2 (рис. 5 і 6).

Як впливає з рис. 2 і 4, варіації f_oF2 також узгоджуються зі змінами приземного атмосфер-

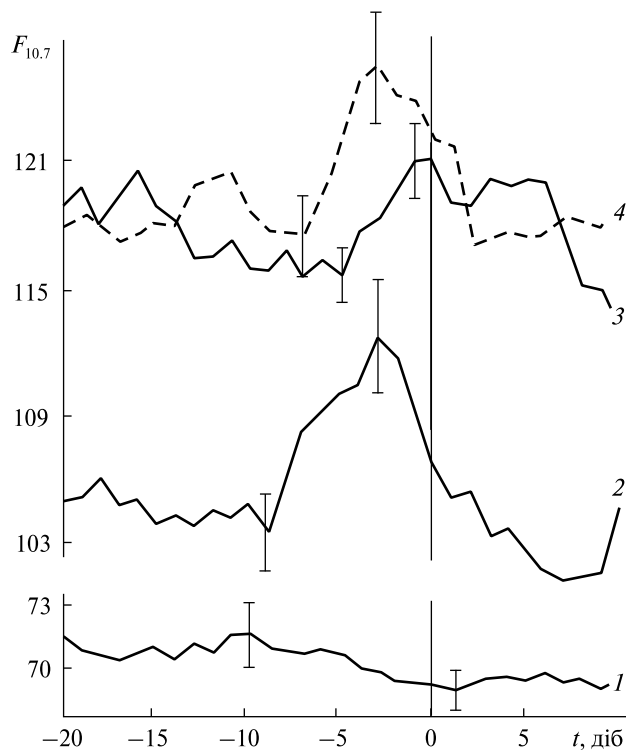


Рис. 7. Зміни сонячної активності (індекс $F_{10.7}$) за всі розглянуті періоди: 1 — БД4, 2 — БД3, 3 — БД2, 4 — БД1

ного тиску P на тій же станції, що є підтвердженням раніше отриманих результатів [48]. Цей зв'язок більш очевидний у мінімумі СА, і виявляється лише як тенденція на тлі сильніших варіацій СА і ГМА поблизу максимуму 11-річного сонячного циклу.

Зміни СА за даними БД2 — БД4 характеризуються стійким максимумом поблизу різкого зростання ГСА, тоді як за даними БД1 (поблизу мінімуму 11-річного циклу СА) вони були незначні (рис. 7). Таким чином, у більшості випадків посилення ГСА припадають на періоди підвищеного рівня СА. Однак якщо розглядати окремі активні періоди, то лише 60...75 % розглянутих підсилень ГСА узгоджувалися зі збільшенням СА і забезпечували узгодженість часових варіацій цих величин в середньому. Отже, зміни СА не можуть виступати тригером всіх без винятку ЗТ. Якщо не проводити строгий відбір даних за наявністю перед посиленням ГСА тривалого спокійного періоду, то прогностична роль СА, мабуть, буде ще меншою.

Зміни ГМА характеризуються невеликим максимумом поблизу нульової дати (див. приклад на рис. 2), за винятком 2015 р. (БД4), що є вказівкою на реальність цього явища (див. також [18]). Беручи до уваги невелику величину ефекту, а також деяке зміщення положення максимуму по відношенню до нульового дня в окремих БД, можна припустити, що даний ефект зумовлений наявністю чинника, що впливає як на ГСА, так і на ГМА. Таким фактором можуть бути варіації параметрів сонячного вітру. З одного боку, вони безпосередньо впливають на рівень ГМА, з іншого боку, по ланцюжку сонячний вітер — модуляція галактичних космічних променів — хмарність — циркуляція атмосфери — зміна тиску на земну поверхню під дією рухомих повітряних мас — ініціація підготовлених землетрусів [45] можуть вплинути на ГСА.

Таким чином, у періоди різкого збільшення ГСА спостерігаються зміни атмосферних, іоносферних, геомагнітних і сонячних даних. Істотно, що ефекти ГСА в атмосфері та іоносфері зафіксовано по всіх чотирьох БД, для космічної погоди наявність характерних змін встановлено за даними трьох з чотирьох БД: збільшення СА поблизу нульової дати не зафіксоване у БД1, а збільшення ГМА — у БД4. Для приземного атмосферного тиску зазначений зв'язок, мабуть, найбільш стійкий, для іоносферних параметрів — трохи менше, для сонячних і геомагнітних даних така відповідність спостерігається не завжди.

Як і слід було очікувати, для іоносфери зв'язок з процесами у тропосфері та літосфері більш очевидний у мінімумі 11-річного циклу СА, тоді як при високому рівні СА вплив «знизу» менш помітний.

Важливо відзначити, що ефекти ГСА отримано у сейсмічно спокійних регіонах і незалежно від місця, де відбувалися найбільш сильні ЗТ, тобто зазначені ефекти дійсно мали глобальний характер.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Беручи до уваги, що зв'язок ГСА з процесами в атмосфері та іоносфері раніше розглядався у невеликій кількості робіт, в цьому обговоренні

ми будемо звертати увагу на стійкість і характер зв'язків, зокрема на наявність безперервних пилкоподібних змін атмосферних та іоносферних показників. Тому при викладі результатів і обговоренні будемо максимально повно зіставляти між собою результати обробки даних незалежних БД, а також залучати отримані раніше результати.

З розглянутих атмосферних та іоносферних параметрів варіації приземного тиску P , мабуть, демонструють найбільш стійкі закономірності при посиленні ГСА. Так, для ЗТ в 2011 р. локальний мінімум тиску був зафіксований як на середньоширотному (Москва, Караганда, Хабаровськ, Боулдер), так і довготному (Тіксі, Хабаровськ, Ухань, Дарвін) ланцюжках станцій. Найбільш виразним мінімум P був у Хабаровську, найменш виразним — у Боулдері. У періоди посилення ГСА в 2013 р. зміни P на ст. Боулдер практично повторювали зміни P на ст. Мілстон Хілл в 2008 р. (рис. 8). Таким чином, мінімум P напередодні ЗТ — досить стабільне явище, що охоплює великі території. У західній півкулі (точніше, на середніх широтах північної півкулі, які ми розглядали) цей мінімум виражений найменше або зміщується на більш ранні дні, так що безпосередньо перед ЗТ спостерігається максимум тиску, збільшуючи різницю тисків між західною і східною півкулями.

Очевидно, що дані окремих станцій не дають повної картини глобальної атмосферної циркуляції, проте повторюваність ситуації в різні роки вказує на реальність впливу переміщення повітряних мас на ініціацію підготовлених ЗТ у глобальному масштабі.

Для іоносферних параметрів зв'язок зі змінами ГСА також досить стійкий, але на тлі більш значних варіацій іншої природи. Основні відмінності результатів для окремих іоносферних станцій стосуються певної різниці часу появи локального максимуму поблизу нульової дати в 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 максимумами P також не збігаються. І дані іоносферних станцій, і тим більше дані про планетарний ПЕВ,

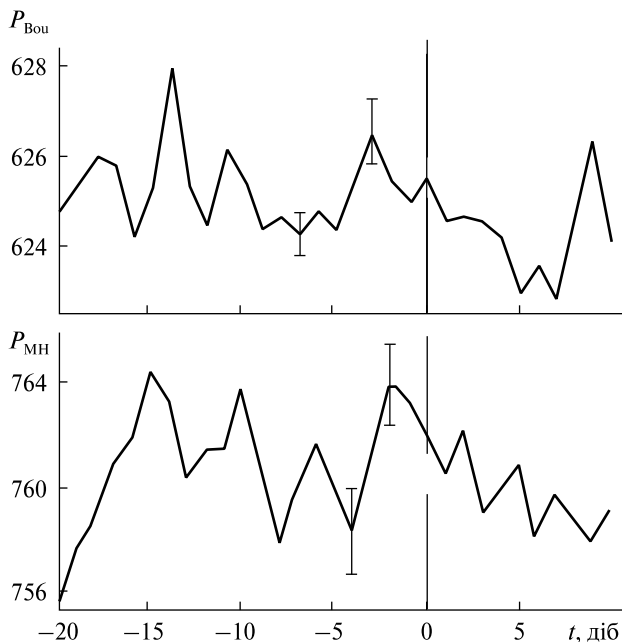


Рис. 8. Порівняння середніх змін приземного атмосферного тиску P на станціях Боулдер (БД3) і Мілстон Хілл (БД1) при різкій зміні глобальної сейсмічної активності

вказують на те, що цей ефект носить глобальний характер і вимагає для свого пояснення інших механізмів, ніж ті, що розглядаються у багатьох роботах [35, 36, 43].

Отримані результати підтверджують важливу роль СА як одного з тригерів землетрусів, проте зміни СА не можуть виступати тригером всіх без винятку землетрусів.

Беручи до уваги наявність зв'язків також між більшістю розглянутих параметрів, можна констатувати часту (хоча і часткову — з урахуванням амплітуди ефектів) синхронізацію процесів у системі ЗАІМ, у якій кожна з підсистем може виступати як джерелом, так і наслідком збурень, що є характерним для нелінійних систем [20]. Безумовно, важливу роль синхронізатора процесів у різних геосферах відіграють зміни космічної погоди, здатні впливати на кожен з підсистем.

У багатьох роботах, в яких встановлено певні зв'язки сейсмічної активності (як правило, для конкретного регіону) з явищами в земній атмосфері або в геокосмосі, часто пропонується методика прогнозу ЗТ на основі встановлених зв'язків [2]. В даному випадку також показано

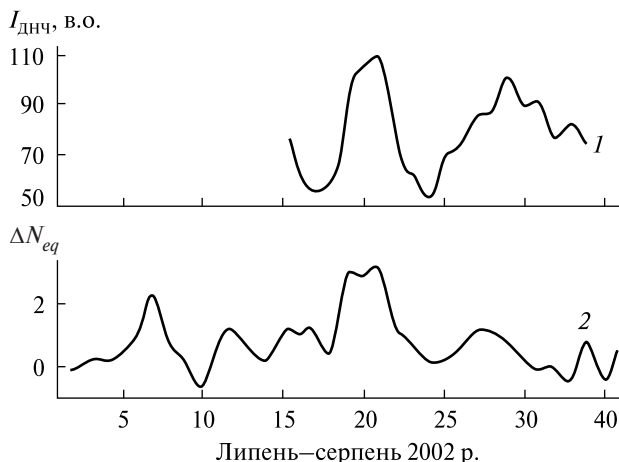


Рис. 9. Зміни інтенсивності ДНЧ-випромінювання (1) і різниці між кількістю слабких і сильних регіональних землетрусів (2) за вимірюваннями у Кримському сейсмічному регіоні [26]

зв'язки, які ми вважаємо реальними і такими, що заслуговують надалі фізичної інтерпретації. Водночас поки що немає достатніх підстав для їхнього використання у прогнозуванні ЗТ, бо ці зв'язки, як правило, проявляються лише в середньому, тоді як для окремих подій їхні індивідуальні особливості можуть виявитися домінуючими (див. розглянутий вище приклад для зв'язку СА і ЗТ). Беручи до уваги нестійкість поведінки нелінійних систем, проблема прогнозу ЗТ видається ще складнішою [23].

При прогнозі регіональної сейсмічної активності за спостереженнями в цьому ж регіоні необхідно також враховувати, що частина виявлених ефектів буде зумовлена сейсмічними подіями глобального масштабу. Для поділу регіонального і планетарного ефектів необхідно використовувати одночасні спостереження як у регіоні, для якого передбачається складати прогноз, так і у сейсмічно спокійному регіоні для контролю глобальних процесів. Раніше необхідність такого підходу було обґрунтовано в роботах [26, 27] на основі порівняння регіональних і глобальних ефектів у варіаціях ДНЧ-випромінювання. В роботі [22] також запропоновано враховувати роль глобальних ефектів при прогнозі регіональної сейсмічної активності. Таким чином, очевидним стає завдання створення глобальної системи

прогнозування сейсмічної активності з єдиним центром обробки і аналізу інформації, що надходить оперативно.

Незважаючи на недостатні підстави для безпосередньої розробки методики прогнозу, отримані результати мають практичну цінність, бо вказують на можливість інших, при цьому майже неперервних (в тому числі тригерних) механізмів взаємодії геосфер в системі ЗАІМ, здатних забезпечити як відносно короточасні (тижні — місяці), так і кліматичні зміни на тривалих інтервалах часу (роки — десятиліття).

Для того щоб отримати уявлення про фізичні процеси, відповідальні за варіації ГСА та зумовлених нею ефектів, звернемося до результатів дослідження варіацій природного ДНЧ-випромінювання на границі «земля — повітря» у періоди підготовки та реалізації ЗТ, через те що вони тісно пов'язані з напружено-тектонічним станом гірських порід [24]. Як випливає з більшості досліджень, сильні ЗТ відбуваються на спаді або після зменшення інтенсивності ДНЧ-випромінювання, часто при наявності додаткових сплесків поблизу моменту головного поштовху, зумовлені активними процесами в осередку ЗТ. Наші раніше проведені дослідження дозволяють конкретизувати зазначену закономірність.

Раніше [26] для Кримського сейсмічного регіону було отримано, що інтенсивність ДНЧ-випромінювання в діапазоні частот 2.5...50 кГц пропорційна слабким ЗТ (в цьому випадку з магнітудою $M < 3.6$). По відношенню до всього обсягу потенційного сейсмічного осередку слабкі ЗТ забезпечують розтріскування відносно дрібних блоків земної кори, при цьому тектонічні напруги в сейсмічному регіоні продовжують збільшуватися. Навпаки, більш сильні ЗТ за рахунок утворення магістральних розривів призводять до зниження напруги в сейсмічному регіоні і, відповідно, до зменшення інтенсивності ДНЧ-випромінювання. Відповідність між ЗТ і інтенсивністю ДНЧ-випромінювання стає ще більш точною при використанні різниці кількості сильних і слабких ЗТ, що можна розглядати як оцінку остаточних напружень, що відображаються варіаціями ДНЧ-випромінювання (рис. 9).

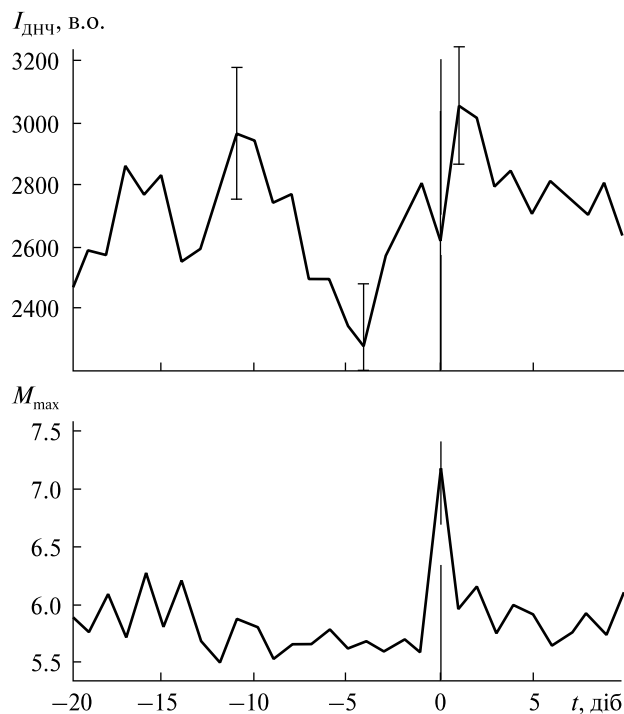


Рис. 10. Середні зміни інтенсивності ДНЧ-випромінювання у сейсмічно спокійному регіоні (Харківська обл.) при різкій зміні глобальної сейсмічної активності [47]

Пізніше для кількох часових інтервалів були отримані варіації ДНЧ-випромінювання в сейсмічно спокійному регіоні (Харківська область, Україна: 49.7° N; 36.2° E), які можна пов'язати або з конкретними сильними ЗТ на відстані тисяч кілометрів від місця спостережень, або з варіаціями ГСА. Зокрема, для періоду часу, який практично збігається з періодом БДІ (див. вище), отримано [47], що посиленню ГСА передував глибокий мінімум ДНЧ-випромінювання (–4-й день на рис. 10), що в цілому узгоджується з отриманими раніше результатами. Можна виділити також декілька максимумів: поблизу –10-ї доби (узгоджується з очікуваним часом появи короткострокових електромагнітних передвісників [6]), –1-ї доби (оперативний передвісник), 1-2-й день після нульового дня (прояв афтершокової активності), а також в інтервалі від –17-ї до –15-ї доби (найімовірніше, пов'язаний з попереднім збільшенням ГСА, добре помітним на нижньому графіку рис. 10). Всі максимуми, крім

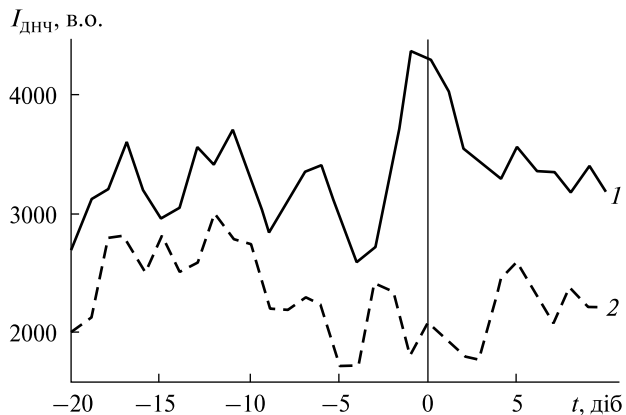


Рис. 11. Приклад зміни інтенсивності ДНЧ-випромінювання у сейсмічно спокійному регіоні (Харківська обл.) при різних значеннях максимальної магнітуди землетрусів [47]: 1 – $M_{\max} = 6.5$ (13.06.2007), 2 – $M_{\max} = 7.8$ (12.05.2008)

оперативного передвісника, достовірні ($p < 0.1$). Незважаючи на невелику амплітуду оперативного провісника, його також можна вважати реальним, бо він зафіксований перед усіма розглянутими посиленнями ГСА, при цьому його положення закономірно зміщується на більш ранню добу (від 0-х до 3-х) у міру збільшення максимальної магнітуди ЗТ M_{\max} від 6.4 до 7.8, при цьому його амплітуда зменшується. Як приклад на рис. 11 показано зміни ДНЧ-випромінювання для двох періодів з істотно різними значеннями M_{\max} .

Відзначимо добре помітний циклічний пилкоподібний характер змін інтенсивності ДНЧ-випромінювання, показаних на рис. 10 і 11 (при наявності особливостей, пов'язаних з проявом передвісників), зумовлений, ймовірно, циклічним характером тектонічних процесів [13]. Таким чином, зазначений в розділі «Результати» пилкоподібний характер змін атмосферних і іоносферних показників виявляється тісно пов'язаним з характером тектонічних процесів. Оскільки всі ефекти зареєстровано в сейсмічно спокійних регіонах, мова йде про глобальні процеси.

Розглянемо можливий механізм появи глобальних ефектів у атмосфері та іоносфері при зміні ГСА. Добре відома [12, 32] роль виходу на поверхню радону та інших газів у області підготовки і реалізації землетрусу. Відомо також, що

цей процес носить глобальний характер [5, 16]. Важливою особливістю процесу глибинної дегазації є його нерівномірність як у часі, так і у просторі. Істотно, що основний потік глибинних відновлених газів розвантажується в рифтових зонах серединно-океанічних хребтів, тобто поза прямою залежністю від локалізації та магнітуди землетрусів. Можна очікувати, що ці та інші процеси можуть призводити до змін провідності нижніх шарів тропосфери і глобального електричного кола у планетарному масштабі, викликаючи вторинні ефекти [12].

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз з використанням чотирьох незалежних баз щоденних даних показує обґрунтованість такого поняття, як глобальна сейсмічна активність і його зв'язок з процесами у верхніх геосферах. Встановлено збільшення критичної частоти шару F2 при різкому посиленні ГСА після тривалого спокійного періоду. Незважаючи на невелику амплітуду (не більше 0.5 МГц), ефект досить стійкий і проявляється майже одночасно на іоносферних станціях, розташованих у східній і західній півкулях, а також у планетарних значеннях ПЕВ. При цьому в іоносферних варіаціях, як і раніше, простежується вплив як тропосфери (особливо при низькому рівні СА), так і космічної погоди, характеристики якої у 75 % випадків також показують зв'язок з ГСА. Отже, космічна погода часто, але не завжди може виступати тригером ЗТ після тривалого періоду відносного сейсмічного затишшя. Найімовірніше, одночасно реалізується кілька різних зв'язків між геосферами, частково синхронізованих змінами космічної погоди.

2. Встановлено появу мінімуму приземного атмосферного тиску напередодні посилення ГСА, положення якого трохи зміщується на

більш ранні дні перед сильнішими ЗТ. В цілому в західній півкулі для досліджених періодів мінімум тиску настає раніше, ніж у східній, що призводить до помітного збільшення різниці тисків між півкулями на 10 мм рт. ст. Отримані результати можна розглядати як свідчення зв'язку глобальної сейсмічності та глобальної атмосферної циркуляції.

3. Отримані ефекти землетрусів у тропосферних та іоносферних показниках, як правило, мають характер не локального сплеску на деякому фоновому рівні, а стрибка з подальшим поступовим спаданням (чи збільшенням) показника до наступного активного періоду (пилкоподібна крива), тобто вплив літосфери на розташовані вище шари є неперервним і носить циклічний характер, зумовлений, ймовірно, циклічним характером тектонічних процесів.

4. Можливим механізмом появи глобальних ефектів у атмосфері та іоносфері при зміні ГСА запропоновано розглядати вихід радону та інших газів на поверхню. Цей процес є глобальним і нерівномірним у часі, а основний потік глибинних газів вивільнюється в рифтових зонах серединно-океанічних хребтів, поза прямою залежністю від локалізації і магнітуди землетрусів.

Роботу Л. Ф. Черногора виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера», робота Захарова І. Г. і Черногора Л. Ф. також частково підтримувалася в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (відповідно державні номери 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882). Автори висловлюють подяку А. М. Цимбалу за надані дані про повний електронний вміст.

ЛІТЕРАТУРА

1. Боков В. Н. Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений. *Изв. РГО РАН*. 2003. **135**, № 6. С. 54–65.
2. Боярчук К. А., Карелин А. В., Пулинец С. А., Тertyшников А. В., Узунов Д. П., Юдин И. А. Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера. *Космонавтика и ракетостроение*. 2012. № 3 (68). С. 21–31.
3. Браунли К. А. *Статистическая теория и методология в науке и технике*. Москва: Наука, 1977. 245 с.
4. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса. *Тихоокеанская геология*. 1998. **17**, № 6. С. 95–103.
5. Войтов Г. И. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли. Теоретические и региональные проблемы геодинамики. *Тр. Геол. ин-та РАН*. 1999. **515**. С. 242–251.
6. Гнедышев М. Н., Оль А. И. О методике некоторых гелиобиологических исследований. *Пробл. космич. биологии*. 1982. **43**. С. 216–219.
7. Гордиец Б. Ф., Марков М. Н., Шелепин Л. А. *Солнечная активность и Земля*. Москва: Знание, 1980. 64 с.
8. Горькавый Н. Н., Трапезников Ю. А., Фридман А. М. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли. *Докл. РАН. Геофизика*. 1994. **338**, № 4. С. 525–527.
9. Добровольский И. П. *Теория подготовки тектонического землетрясения*. М.: Наука, 1991. 224 с.
10. Казачевская Т. В., Нусинов А. А. Прогностическая модель коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1986. **15**, № 2. С. 593–596.
11. Летников Ф. А. *Синергетика геологических систем*. Новосибирск: Наука, 1992. 230 с.
12. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, инициируемых ионизацией. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. **55**, № 4. С. 540–558.
13. Пущаровский Ю. М. *Глобальные проблемы общей тектоники*. Москва: Науч. мир, 2001. 520 с.
14. Рuzмайкин А. Климат как игра случая. *Успехи физ. наук*. 2014. **184**, № 3. С. 297–311.
15. Садовский М. А., Писаренко В. Ф. *Сейсмический процесс в блоковой среде*. М.: Наука, 1991. 96 с.
16. Сывороткин В. Л. *Глубинная дегазация и глобальные катастрофы*. Москва: Геоинформмарк, 2002. 250 с.
17. Сытинский А. Д. О связи землетрясений с солнечной активностью. *Физика Земли*. 1989. № 2. С. 13–30.
18. Тertyшников А. В. Оценка практической значимости геомагнитных предвестников сильных землетрясений. *Гелиогеофиз. исслед.* 2013. **3**. С. 63–70.
19. Хомутов С. Ю. Исследование зависимости глобальной сейсмичности от положения Луны. *Геология и геофизика*. 1995. **36**, № 4. С. 88–102.
20. Черногор Л. Ф. *О нелинейности в природе и науке: Монография*. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
21. Шестопалов И. П., Харин Е. П. Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности разной длительности. *Геофиз. журн.* 2006. **28**, № 4. С. 59–70.
22. Широков В. А. *Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996–2000 гг. с магнитудой $M = 6–7.8$ по комплексу сейсмологических и геофизических данных*. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 95–116.
23. Шуман В. Н. Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы. *Геофиз. журн.* 2015. **37**, № 2. С. 38–55.
24. *Электромагнитные предвестники землетрясений*. Ред. М. А. Садовский. Москва: Наука, 1982. 88 с.
25. Bak P. *How nature works: The science of self-organized criticality*. New York: Springer-Verlag, 1996. 212 p.
26. Bogdanov Yu. A., Zakharov I. G., Tyrnov O. F., Hayakawa M. Electromagnetic effects Associated with Regional Seismic Activity in Crimea during the Interval July–August 2002. *J. Atmosph. Electricity*. 2003. **23**, № 2. P. 57–67.
27. Bogdanov, Yu. A., Zakharov I. G. Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity. *Proc. of the 6th Int. Conf.: Problem of Geocosmos*. St. Petersburg, Petrodvorets, 2006. P. 357–360.
28. Chao B. F., Gross R. S. Changes in Earth's rotational velocity induced by earthquakes. *Geophys. Int.* 1995. **122**. P. 776–783.
29. Chernogor L. F. The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.* 2011. **32**, № 11. P. 3199–3218.
30. Costain J. K., Bollinger G. A. Correlations between streamflow and intraplate seismicity in the central Virginia, U.S.A., seismic zone: evidence for possible climatic controls. *Tectonophysics*. 1991. **186**, № 1–2. P. 193–214.
31. Gulyaeva T. Association of Seismic Activity with Solar Cycle and Geomagnetic Activity. *Develop. in Earth Sci.* 2014. **2**. P. 14–19.
32. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes. *Sensors*. 2007. **7**, № 7. P. 1141–1158. doi:10.3390/s7071141

33. Jhuang H. K., Ho Y. Y., Kakinami Y., Liu J. Y., Oyama K.-I., Parrot M., Hattori K., Nishihashi M., Zhang D. Seismo-ionospheric anomalies of the GPS-TEC appear before the 12 May 2008 magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake. *Int. J. Remote Sens.* 2010. **31**. P. 3579–3587.
34. Jin S., Occhipinti G., Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth–Sci. Revs.* 2015. **147**. P. 54–64.
35. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Y., Lizunov G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. and Chem. Earth.* 2009. **34**, № 6–7. P. 485–495. doi:10.1016/j.pce.2008.07.014.
36. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V. On recent physical models of lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling before earthquakes. *Natural Hazard and Earth System Sciences.* 2007. 0000:0001.12. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/796d/9cf121303f56f665cebba41df7427996cb8d.pdf> (Last accessed 17.02.2020).
37. Love J. J., Thomas J. N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 2013. **40**. P. 1165–1170. doi:10.1002/grl.50211.
38. Odintsova S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity. *Phys. and Chem. Earth.* 2006. **31**. P. 88–93.
39. Parrot M., Li M. DEMETER Results related to seismic activity. *Radio Sci. Bul.* 2015. **355**. P. 18–25.
40. Sasorova E., Levin B. The relationship of the global seismic activity with variations in the angular velocity of the Earth’s rotation for 1720–2014 years. *Proc. EGU General Assembly*, 2016. **18**, EGU2016–1687.
41. Sharma G., Champatiray P. K., Mohanty S., Kannaujiya S. Ionospheric TEC modelling for earthquakes precursors from GNSS data. *Quaternary Int.* 2017. **462**. P. 65–74.
42. Shirley J. H. Lunar periodicity in great earthquakes, 1950–1965. *Gerlands Beitr. Geophys.* 1986. **95**, № 6. P. 509–515.
43. Tanimoto T., Heki K., Artru-Lambin J. Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. *Treatise on Geophysics.* 2015. **4**. P. 421–443.
44. Tavares M., Azevedo A. Influences of solar cycles on earthquakes. *Natural Sci.* 2011. **3**. P. 436–443. doi:10.4236/ns.2011.36060.
45. Veretenenko S. V., Ogurtsov M. G. Nature of long-term correlation between cloud state and variations in galactic cosmic rays flux. *Geomagnetism and aeronomy.* 2015. **55**, № 4. P. 442–449.
46. Yao Y. B., Chen P., Zhang S., Chen J. J., Yan F., Peng W. F. Analysis of pre-earthquake ionospheric anomalies before the global $M = 7.0+$ earthquakes in 2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012. **12**. P. 575–585.
47. Zakharov I. G. *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. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801826> (Last accessed 17.02.2020).
48. Zakharov I. G., Chernogor L. F. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018. **58**, № 3. P. 430–437.

REFERENCES

1. Bokov V. N. (2003). Variability of atmospheric circulation as initiator of strong earthquakes. *Bull. of the Rus. Geograph. Soc.*, **135** (6), 54–65 [In Russian].
2. Boyarchuk K. A., Karelin A. V., Pulinet S. A., Tertyshnikov A. V., Uzunov D. P., Yudin I. A. (2012). A unified concept for detecting signs of impending strong earthquake in the framework of integrated system of lithosphere – atmosphere – ionosphere – magnetosphere. *Cosmonautics and Rocket Sci.*, **3** (68), 21–31 [In Russian].
3. Brownlee K. A. (1977). *Statistical theory and methodology in science and Engineering.* Moscow: Nauka [In Russian].
4. Vikulin A. V., Ivanishin A. G. (1998). Rotational model of seismic process. *Pacific geology*, **17**(6), 95–103 [In Russian].
5. Voitov G. I. (1999). On the cold degassing of methane into the troposphere of the Earth. Theoretical and regional problems of geodynamics. *Proc. of Geol. In-te of RAS.* Is. 515. Moscow: Nauka, 242–251 [In Russian].
6. Gnedyshev M. N., Ol A. I. (1982). On the methodology of some heliobiological studies. *Probl. Space Biology*, **43**, 216–219 [In Russian].
7. Gordiets B. F., Markov M. N., Shelepin L. A. (1980). *Solar activity and the Earth.* Moscow: Znanie [In Russian].
8. Gorkavy N. N., Trapeznikov Yu. A., Fridman A. M. (1994). On the global component of the seismic process and its relationship with observed features of the Earth’s rotation. *Reports of the Academy of Sciences. Geophysics*, **338**(40), 525–527 [In Russian].
9. Dobrovolsky I. P. (1991). *Theory of tectonic earthquake preparation.* Moscow: Nauka [In Russian].
10. Kazachevskaya T. V., Nusinov A. A. (1986). Prognostic model of short-wave ultraviolet radiation of the Sun. *Geomagnetism and aeronomy*, **15**(2), 593–596 [In Russian].
11. Letnikov F. A. (1992). *Synergetics of geological systems.* Novosibirsk: Science [In Russian].

12. Pulinets S. A., Uzunov D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. (2015). Physical basis for the generation of short-term earthquake precursors. A complex model of geophysical processes in the lithosphere – atmosphere – ionosphere – magnetosphere, initiated by ionization. *Geomagnetism and Aeronomy*, **55**(4), 521–538 [In Russian].
13. Pushcharovsky Yu. M. (2001). *General problems of global tectonics*. Moscow: Nauchnyj mir [In Russian].
14. Ruzmaikin A. (2014). Climate as a game of chance. *Adv. in Phys. Sci.*, **184**(3), 297–311 [In Russian].
15. Sadovsky M. A., Pisarenko V. F. (1991). *Seismic process in a block environment*. Moscow: Nauka [In Russian].
16. Syvorotkin V. L. (2002). *Deep degassing and global disasters*. Moscow: Geoinformmark [In Russian].
17. Tertyshnikov A. V. (2013). Assessment of practical significance of geomagnetic precursors of strong earthquakes. *Heliogeophys. Res.*, **3**, 63–70 [In Russian].
18. Sytinsky A. D. (1989). On the relationship of earthquakes with solar activity. *Phys. Earth*, **2**, 13–30 [In Russian].
19. Khomutov S. Yu. (1995). Investigation of dependence of global seismicity on of moon position. *Geology and Geophys.*, **36**(4), 88–102 [In Russian].
20. Chernogor L. F. (2008). *On nonlinearity in nature and science*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ. [In Russian].
21. Shestopalov I. P., Kharin E. P. (2006). Time variability of the Earth's seismicity relationships with solar activity cycles of different durations. *Geophys. J.*, **28**(4), 59–70 [In Russian].
22. Shirokov V. A. (2001). Experience of short-term forecast of time, place and strength of Kamchatka earthquakes in 1996–2000 with magnitude $M = 6–7.8$ for a complex of seismological and geophysical data. *Geodynamics and volcanism of the Kuril-Kamchatka island-arc system*. Petropavlovsk-Kamchatsky: In-te of volcan. geology and geochem. of the RAS, 95–116 [In Russian].
23. Shuman V. N. (2015). Nonlinear dynamics, seismicity and aerospace sounding systems. *Geophys. J.*, **37**(2), 38–55 [In Russian].
24. Sadovsky M. A. (Ed.) (1982). *Electromagnetic earthquake precursors*. Moscow: Nauka [In Russian].
25. Bak P. (1996). *How nature works: The science of self-organized criticality*. New York: Springer-Verlag.
26. Bogdanov Yu. A., Zakharov I. G., Tyrnov O. F., Hayakawa M. (2003). Electromagnetic effects Associated with Regional Seismic Activity in Crimea during the Interval July–August 2002. *J. Atmosph. Electricity*, **23**(2), 57–67.
27. Bogdanov Yu. A., Zakharov I. G. (2006). *Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity*. Proc. of the 6th Int. Conf.: Problem of Geocosmos. St. Petersburg, Petrodvorets, 357–360.
28. Chao B. F., Gross R. S. (1995). Changes in Earth's rotational energy induced by earthquakes. *Geophys. Int.*, **122**, 776–783.
29. Chernogor L. F. (2011). The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.*, **32**(11), 3199–3218.
30. Costain J. K., Bollinger G. A. (1991). Correlations between streamflow and intraplate seismicity in the central Virginia, U.S.A., seismic zone: evidence for possible climatic controls. *Tectonophysics*, **186**(1–2), 193–214.
31. Gulyaeva T. (2014). Association of Seismic Activity with Solar Cycle and Geomagnetic Activity. *Development in Earth Sci.*, **2**, 14–19.
32. Hayakawa M. (2007). VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes. *Sensors*. **7** (7), 1141–1158. doi:10.3390/s7071141.
33. Jhuang H. K., Ho Y. Y., Kakinami Y., Liu J. Y., Oyama K.-I., Parrot M., Hattori K., Nishihashi M., Zhang D. (2010). Seismo-ionospheric anomalies of the GPS-TEC appear before the 12 May 2008 magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake. *Int. J. Remote Sens.*, **31**, 3579–3587.
34. Jin S., Occhipinti G., Jin R. (2015). GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth-Sci. Revs.*, **147**, 54–64.
35. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Yu., Lizunov G. (2009). AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. and Chem. of the Earth*, **34**(6–7), 485–495. doi:10.1016/j.pce.2008.07.014.
36. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V. (2007). On recent physical models of lithosphere – atmosphere – ionosphere coupling before earthquakes. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 0000:0001.12. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/796d/9cfd121303f56f665cebba41df7427996cb8d.pdf> (Last accessed 17.02.2020).
37. Love J. J., Thomas J. N. (2013). Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1165–1170. doi:10.1002/grl.50211.
38. Odintsova S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. (2006). Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity. *Phys. and Chem. Earth*, **31**, 88–93.
39. Parrot M., Li M. (2015). DEMETER Results related to seismic activity. *Radio Sci. Bul.*, **355**, 18–25.
40. Sasorova E., Levin B. (2016). The relationship of the global seismic activity with variations in the angular velocity of the Earth's rotation for 1720–2014 years. *Proc. EGU General Assembly*, 18, EGU2016–1687.
41. Sharma G., Champatiray P. K., Mohanty S., Kannaujia S. (2017). Ionospheric TEC modelling for earthquakes precursors from GNSS data. *Quatern. Internat.*, **462**, 65–74.

42. Shirley J. H. (1986). Lunar periodicity in great earthquakes, 1950–1965. *Gerlands Beitr. Geophys.*, **95** (6), 509–515.
43. Yao Y. B., Chen P., Zhang S., Chen J. J., Yan F., Peng W. F. (2012). Analysis of pre-earthquake ionospheric anomalies before the global $M = 7.0+$ earthquakes in 2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **12**, 575–585.
44. Tanimoto T., Heki K., Artru-Lambin J. (2015). Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. *Treatise on Geophysics*, Oxford: Elsevier, **4**, 421–443.
45. Tavares M., Azevedo A. (2011). Influences of solar cycles on earthquakes. *Natural Sci.*, **3**, 436–443. doi:10.4236/ns.2011.36060.
46. Veretenenko S. V., Ogurtsov M. G. (2015). Nature of long-term correlation between cloud state and variations in galactic cosmic rays flux. *Geomagnetism and aeronomy*, **55**(4), 442–449.
47. Zakharov I. G. (2018). *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. N 13800, 5 p.
48. Zakharov I. G., Chernogor L. F. (2018). Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, **58**(3), 430–437.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2020

Після доопрацювання 21.05.2020

Прийнято до друку 16.01.2021

Received 17.02.2020

Revised 21.05.2020

Accepted 16.01.2021

I. G. Zakharov, Senior Researcher, Ph.D. in Phys.&Math.

E-mail: giz-zig@ukr.net

L. F. Chernogor, Dr.Sci. in Phys.&Math., Professor

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

V. N. Karazin National University

4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

THE GLOBAL SEISMIC ACTIVITY INFLUENCE ON PROCESSES IN ATMOSPHERE AND IONOSPHERE

In recent decades, ideas about earthquakes (EQ) have been formed as a final stage of a planetary continuous self-organizing tectonic process with periods of accumulation and relaxation of tectonic stresses. However, the scientific literature still presents studies of the response of atmospheric and ionospheric processes to individual strong EQs. In this paper, for the first time, the relationship between processes in the lithosphere, troposphere, and ionosphere is considered, taking into account new ideas about the seismic process as a global phenomenon and on the background of processes caused by space weather. Both planetary data (EQ, total electron content (TEC) of the ionosphere) and data (atmospheric pressure, critical frequency of the F2 layer of the ionosphere) of widely spaced observation points in the western and eastern hemispheres were used. To increase the reliability of statistical results, 4 independent databases of daily data for 2007–2015 were used. Stable effects of global seismic activity (GSA) in the considered parameters are established. Thus, the critical frequency of the F2 region with a sharp increase in the GSA increases by 0.4–0.5 MHz. This effect is quite stable and manifests itself almost simultaneously at ionospheric stations of the eastern and western hemispheres, as well as in planetary TEC values.

At the same time, in the ionospheric variations, as before, the influence of both the troposphere (especially at a low level of solar activity) and space weather is traced, the characteristics of which in 75 % of cases also show an association with GSA. Therefore, space weather often but not always can act as a trigger on the EQs. In general, in the western hemisphere, the minimum atmospheric pressure occurs earlier than in the eastern, which leads to a noticeable increase in the pressure difference between the hemispheres by 10 mm Hg, that indicates on the relationship of global seismicity and global atmospheric circulation. The established GSA effects, as a rule, have the character of not a local short-term burst, but a jump followed by a gradual decrease (increase) of the index until the next active period (saw-toothed curve), i.e., the influence of the lithosphere on the overlying layers is continuous and is cyclical in nature, probably due to the cyclical nature of tectonic processes. Most likely, several different couplings between geospheres are realized at the same time, partially synchronized by changes in space weather, which requires new physical mechanisms to explain them.

Keywords: seismic activity, tropospheric and ionospheric disturbances, superposed epoch method.