

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.012>
УДК 550.34:550.510.533

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

Л. Ф. ЧОРНОГОР, Заслужений професор, Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки (1989 р.), двічі лауреат Премії Ради Міністрів СРСР, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

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

ГЛОБАЛЬНІ ТА ЛОКАЛЬНІ ЕФЕКТИ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ В ІОНОСФЕРІ

З використанням карт повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>) для північної півкулі, окрім полярної області, за зимові сезони 2012—2018 років розглянуто іоносферні ефекти потужних сейсмічних подій. Показано, що сейсмо-іоносферний ефект є загальнопланетарним, на який накладаються локальні ефекти над осередками окремих землетрусів (ЗТ). Часові варіації ПЕВ поблизу моментів сильних ЗТ на далекій відстані від їхніх осередків (глобальний ефект) складаються з двох максимумів: передвісника та «афтершокового» максимуму. У варіаціях ПЕВ над осередком ЗТ (локальний ефект) зазвичай реєструється лише передвісник, амплітуда якого у нічні години приблизно удвічі більша (у середньому біля 8 %), ніж удень. Завжди (локально та глобально) за позитивним сплеском ПЕВ спостерігаються його зменшені значення протягом кількох діб. Зона максимальної амплітуди сейсмо-іоносферного ефекту припадає на середні широти, особливо 35...40° пн. ш., а в межах цієї зони — на довготи поблизу 30° зх. д. (Серединно-Атлантичний хребет) та 140...150° сх. д. (Японські острови та прилегла акваторія Тихого океану). Широтні амплітудні максимуми сейсмо-іоносферного ефекту добре збігаються з широтними максимумами кількості ЗТ як у географічній, так і геомагнітній системах координат. Зміни кількості ЗТ та, відповідно, ефекту в іоносфері за геомагнітними координатами більш впорядковані. Це свідчить про значний вплив на сейсмічність тих самих процесів на межі рідкого ядра та нижньої магнії, що зумовлюють формування магнітного поля Землі. Крім сейсмічних поясів та зон серединно-океанічних хребтів, збільшення ПЕВ зафіксовано уздовж так званих лінеаментів, що маркують ослаблені зони земної кори з підвищеними потоками глибинних газів. Відповідність просторових особливостей сейсмічності та сейсмо-іоносферного ефекту свідчать на користь «радонового» механізму літосферно-іоносферного зв'язку та опосередковано підтверджують роль глибинних газів у формуванні загальнопланетарних особливостей сейсмічності.

Ключові слова: іоносфера, сейсмічність, повний електронний вміст, літосферно-іоносферна взаємодія, локальні збурення, загальнопланетарні збурення.

ВСТУП

Іоносферні ефекти землетрусів (ЗТ) займають важливе місце у сучасних дослідженнях. Виходячи з практичної задачі пошуку передвісників ЗТ, необхідних для прогнозування цього небезпечного явища, основну увагу приділяють ефек-

там напередодні окремих потужних ЗТ (див., наприклад, [13, 24, 25, 29, 31, 34]). Зазвичай дослідження проводять у межах так званої зони прояву передвісників, радіус R якої визначається магнітудою землетрусу M [5]:

$$R_d = e^M \text{ (км)}. \quad (1)$$

Цитування: Захаров І. Г., Черногор Л. Ф. Глобальні та локальні ефекти сейсмічної активності в іоносфері. *Космічна наука і технологія*. 2022. 28, № 6 (139). С. 12—24. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.012>

З наведених та інших досліджень випливає загальна закономірність: іоносферні передвісники в осередках майбутніх ЗТ з'являються за 1...5 діб до головного поштовху. Іоносферні аномалії (зазвичай варіації повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери, рідше — критичної частоти області F2) амплітудою від кількох відсотків до (рідко) кількох десятків відсотків напередодні ЗТ можуть бути як позитивними, так і негативними; деякі дослідники наголошують, що передвісник з'являється лише у нічній іоносфері [34].

В окремих дослідженнях допускається наявність сейсмічних ефектів в іоносфері на довільній відстані від осередків потужних ЗТ [6, 36]. Крім того, у роботі [33] показано, що сейсмічність є важливим чинником змін глобального електричного кола, що також може вплинути на процеси літосферно-іоносферної взаємодії у планетарному масштабі. Роботи [6, 33, 36] об'єднує також підхід до сейсмічності як глобального безперервного тектонічного процесу, що є характерним у цілому для сучасних досліджень (див., наприклад, [4, 14]).

В останні роки все частіше як основний механізм впливу літосфери на атмосферу та іоносферу називають вихід на земну поверхню радіоактивного радону як складової потоку глибинних газів. Найчастіше радоновий механізм згадують для пояснення локальних ефектів поблизу гіпоцентрів сильних ЗТ [13, 15, 28, 31]. Водночас добре відомо, що вихід на поверхню глибинних газів — загальнопланетарний процес, найбільш активний у зонах серединно-океанічних хребтів і сейсмоактивних поясах Землі [3, 10, 15, 16].

Вихід радону та інших глибинних газів на поверхню пов'язують також із так званими лінеаментами (в останні роки їх активно картують за космічними знімками) — протяжними зонами різного масштабу та напрямків на земній поверхні, яким у земній корі відповідають насамперед розломи та зони тріщинуватості [2, 7]. В останні роки лінеаменти почали розглядати як зони (канали) підвищеної проникності земної кори, що служать провідними шляхами для розчинів і газів [2]. Цей процес нерідко призводить до змін характеристик приземної атмосфери та появи унікальних явищ: протанення снігу у ви-

гляді протяжних вузьких зон, лінійності хмарного покриву тощо. На загальнопланетарному рівні зазвичай виділяють широтні лінеаменти стискання, довготні — розтягнення та діагональні — сколювання [2].

Раніше [6, 36] наявність сейсмічних ефектів на довільній відстані від осередків потужних ЗТ було показано з використанням даних окремих континентальних метеорологічних та іоносферних пунктів спостережень, що не дало змоги встановити просторові особливості цих ефектів і дослідити фізичні процеси їхньої генерації. У цій роботі для подолання вказаних обмежень використано щоденні карти повного електронного вмісту, а також для порівняння розглянуто локальні іоносферні ефекти над осередками ЗТ.

БАЗА ДАНИХ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Аналіз проведено для зимових (грудень — січень) сезонів 2012—2018 років. За ці інтервали часу за даними сайту <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search> обрано 22 ЗТ з магнітудою M від 6.3 до 7.9 незалежно від їхніх координат та обов'язково після періоду відносного сейсмічного затишшя для попередження накладання ефектів близьких у часі ЗТ. Зона прояву передвісників R_d для цих ЗТ, згідно з виразом (1), становить від 545 до 2697 км. Основна частина сильних ЗТ відбулась у екваторіальній зоні північної та південної півкулі.

Для дослідження іоносферних ефектів використано карти ПЕВ іоносфери за результатами обробки сигналів навігаційних супутників GPS (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>) в інтервалі широт 0...60° пн. ш. (вся північна півкуля, окрім полярної зони) з кроком 2.5° по широті та 5° по довготі, а також дані поблизу осередків потужних ЗТ за цей час. Через дискретний характер іоносферних даних як локальна характеристика обиралося значення ПЕВ у вузлі сітки, найближчому до координат ЗТ. При цьому відстань від гіпоцентра ЗТ становила у більшості випадків 100...150 км, що у рази менше від зони прояву передвісників (1) для розглянутих магнітуд ЗТ. Для виключення добових іоносферних варіацій використано усереднені значення ПЕВ за добу (при дослідженні глобального ефекту: ну-

львий день — день ЗТ) та значення ПЕВ для одного й того ж місцевого часу, що збігається з часом головного поштовху ЗТ (при дослідженні локального ефекту). Нижче значення ПЕВ наведені в одиницях $\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Розрахунки проведено методом накладених епох з оцінкою достовірності результатів за критерієм Фрідмана (доцільність використання цього критерію показано в роботі [6]). Використано також кореляційний аналіз.

РЕЗУЛЬТАТИ

Глобальні ефекти. На рис. 1 наведено зміни ПЕВ, усереднені для всіх розглянутих ЗТ і для всієї північної півкулі, крім полярної області. Для порівняння на рисунку наведено також середні зміни сонячної (СА) та геомагнітної (ГМА) активності для тих самих умов. Зміни СА незначні (не більше 3 %) та випадкові по відношенню до нульового дня. Рівень ГМА залишався низьким навіть під час невеликого зростання поблизу нульового дня. Відзначимо, що таке збільшення ГМА є досить типовим [6, 17, 19, 36]. Видно, що зміни ПЕВ не збігаються зі змінами космічних факторів, тобто з високою імовірністю зумовлені саме впливом «знизу» (літосфера, тропосфера). Сейсмо-іоносферний ефект проявився у вигляді подвійного максимуму, перший (передвісник) — дещо більший, ніж другий, вже після ЗТ («афтершоковий» максимум). Завдяки значному усередненню при використанні карт (1368 середньодобових значень) результат має високу статистичну достовірність (рівень значущості за критерієм Фрідмана): $p < 0.05$. Перед сплеском ПЕВ спостерігається короткочасне зменшення, після нього — досить тривале невелике зменшення значень ПЕВ. Наявність тренду може бути зумовлене неповною компенсацією сезонних змін ПЕВ.

У межах всієї північної півкулі сейсмо-іоносферний ефект достатньо однотипний. Особливості полягають у тому, що на окремих широтах і довготах, крім основного, з'являються більш ранні сплески ПЕВ (в основному на широтах 55° і вище), але не раніше, ніж за 6 діб до ЗТ (див. рис. 2). Наявність таких сплесків ПЕВ дозволяє припустити, що передвісник для довільних ЗТ можливий за 1...6 діб до ЗТ, хоча для обраних

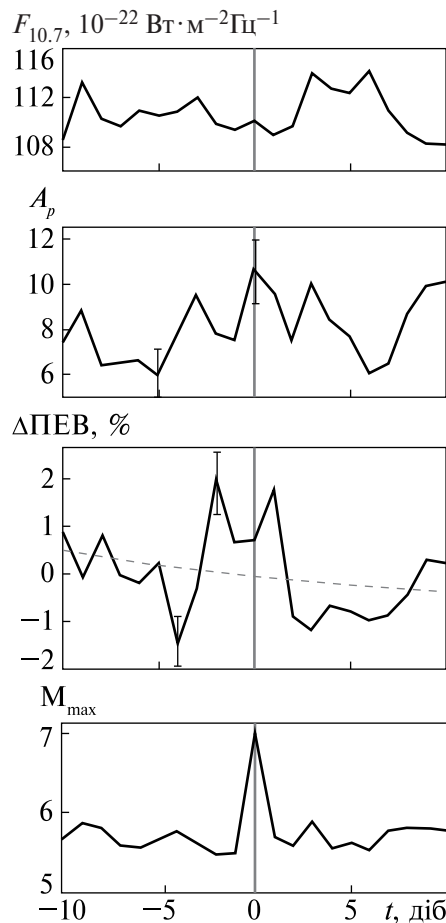


Рис. 1. Середні зміни ПЕВ іоносфери у північній півкулі під час сильних землетрусів. Вертикальною лінією тут і надалі показано момент ЗТ. Штриховою лінією показано тренд

ЗТ основний ефект проявився за дві доби до ЗТ. Лише на окремих довготах азійського сектору обидва максимуми ПЕВ зливаються в один за добу до ЗТ. Майже завжди амплітуда першого максимуму (сплеск ПЕВ до початку ЗТ) дещо більша, ніж у другого, і лише іноді — навпаки. Такий ефект має складний широтно-довготний характер: другий максимум в основному більший там, де амплітуда ефекту більша (рис. 3).

Розглянемо більш детально амплітуду $\Delta \text{ПЕВ}_{eq}$ сейсмо-іоносферного ефекту (рис. 3). Зона, де амплітуда сплеску ПЕВ вища за середній рівень (на рисунку виділено сірим кольором), має форму неправильного овалу, вісь симетрії якого майже збігається з положенням геомагнітного полюса

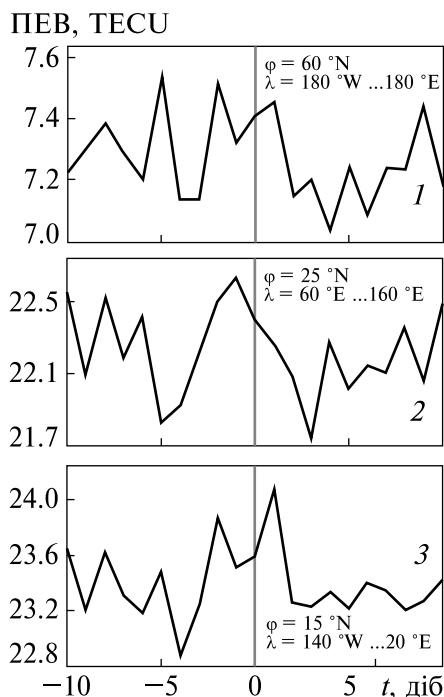


Рис. 2. Регіональні особливості сейсмо-іоносферного ефекту: 1 — додаткові сплески ПЕВ за 3...6 діб до ЗТ, 2 — єдиний максимум ПЕВ, 3 — другий максимум ПЕВ, вищий від першого. Цифрами вказано координати, для яких розраховано зміни ПЕВ

за період, що розглядається (використано дані на середину досліджуваного інтервалу часу, а саме за 2015 рік; URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>). Для південного краю овалу добре помітні чотири зони, по дві навпроти одна одної, де овал має виступи на південь. Можливо, це є результатом впливу стаціонарних планетарних хвиль на процес формування сейсмо-іоносферного ефекту. Північний край овалу менш чіткий. Це можна пов'язати з тим, що північна границя овалу проходить поблизу краю досліджуваної широтної зони (до 60° пн. ш.), а також з тим, що на широтах порядку 55° та вище фонові значення ПЕВ дуже малі, часто менші від 1 TECU, через що навіть окремі невеликі сплески ПЕВ можуть значно вплинути на результат (у відсотках).

Локальні ефекти. Зміни ПЕВ над осередками ЗТ наведено на рис. 4, а. Основним сейсмічним ефектом у ПЕВ іоносфери є передвісник з амплітудою близько 6 %, що з'явився за два дні до ЗТ.

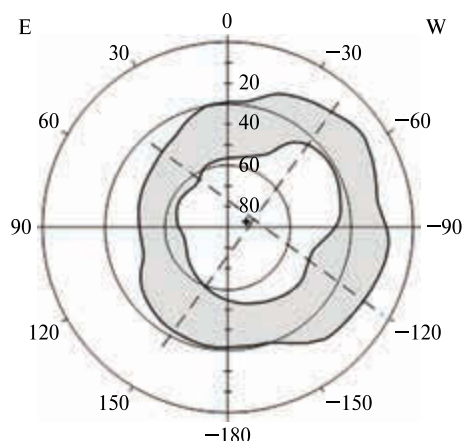


Рис. 3. Овал максимальних значень сейсмо-іоносферного ефекту (значення $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ більші від середнього, виділено сірим кольором). Штрихові лінії — осі овалу, хрестик — положення геомагнітного полюса (2015 рік)

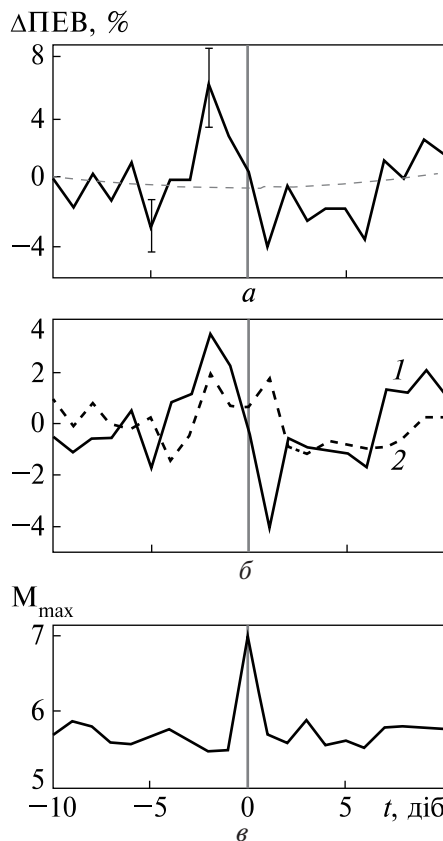


Рис. 4. Середні зміни ПЕВ над осередками сильних ЗТ (локальний ефект): а — первинний результат, б — істинний локальний ефект (крива 1) у порівнянні з глобальним ефектом (крива 2), в — зміни сейсмічної активності

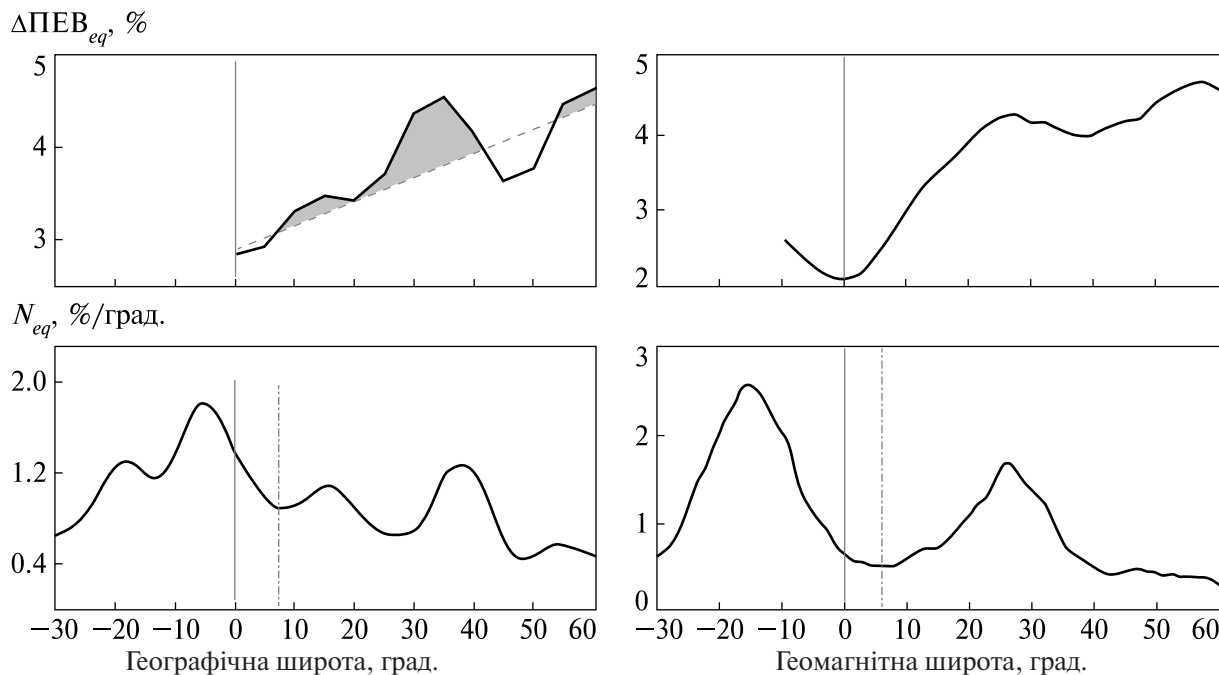


Рис. 5. Широтний розподіл кількості N_{eq} ЗТ з $M \geq 4$ (доля ЗТ у відсотках на градус широти) у зимові сезони 2012–2018 рр. та широтні зміни ΔPEV_{eq} . Сіра вертикальна лінія — екватор, штрих-пунктир — вісь симетрії широтного розподілу ЗТ, штрихова лінія — широтний тренд ΔPEV_{eq}

Встановлений ефект є достовірним для статистичної значущості $p < 0.1$. Перед цим максимумом та після ЗТ значення ПЕВ дещо зменшені. Відсутність другого, «афтершокового» максимуму є основною відмінністю локального сейсмоіоносферного ефекту від глобального.

Оскільки глобальний ефект проявляється всюди, то він, безумовно, проявляється і в осередку окремого ЗТ від інших сильних ЗТ, тобто ефект на рис. 4, а є сумою локального та глобального ефектів. Щоб отримати істинний локальний ефект, віднімемо від сумарного ефекту глобальний ефект (рис. 4, б). Видно, що чистий локальний ефект з'являється дещо раніше глобального та різко згасає після головного поштовху.

Значення ПЕВ для розрахунку локального ефекту брались поблизу моменту головного поштовху у різні години місцевого часу, що дозволило оцінити окремо сейсмічний ефект для денних (11 випадків) та нічних (10 випадків) умов у іоносфері; результати для одного ЗТ у перехідні години не враховувались. Встановлено, що денний ефект подібний наведеному на рис. 4, а, але

з дещо меншою амплітудою. У нічні години, окрім основного максимуму за дві доби до ЗТ і амплітудою близько 8 %, проявився також слабкий максимум у перший день після ЗТ. Тобто, на відміну від результатів [34], у денні години сейсмоіоносферний ефект також проявляється, але має меншу амплітуду.

Як вже відзначалося в наведеному вище огляді, одним з найвірогідніших механізмів появи іоносферних передвісників ЗТ є вихід на земну поверхню радону — одного з глибинних газів. Фізичні особливості цього механізму найбільш повно розглянуто в роботі [13]. Оскільки вихід радону на земну поверхню має певні просторові особливості, можна додатково перевірити реальність радонового механізму шляхом зіставлення просторових особливостей еманції радону та просторових особливостей аномалій в іоносфері. На жаль, безперервні глобальні спостереження радону у наш час не проводяться, тому будемо порівнювати відомі просторові особливості еманції радону (підвищений рівень у сейсмоактивних регіонах, зонах серединно-океанічних

хребтів та вздовж лінеаментів) та просторові особливості сейсмо-іоносферних збурень.

Перевірка радонового механізму сейсмо-іоносферного ефекту. Добре відомо [9, 26, 35], що кількість ЗТ у цілому зменшується від екватора до полюса. Особливості широтного розподілу ЗТ уздовж географічної широти полягають у тому, що центр симетрії сейсмічності зміщений майже на 10° у бік північної півкулі, а також у наявності основних максимумів сейсмічності на $35...40^\circ$ пн. ш. та на $10...20^\circ$ пд. ш. та кількох слабких максимумів. У геомагнітних координатах розподіл ЗТ по широті більш «впорядкований» і має лише два максимуми, також зміщені на північ. Розглянемо широтну залежність сейсмічності для вибраних інтервалів часу та порівняємо її з аналогічними змінами $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$. Результати розрахунків наведено на рис. 5.

Видно, що отримані широтні зміни кількості ЗТ добре відображають відомі з літератури особливості широтних варіацій сейсмічності, а саме поступове збільшення кількості ЗТ від полюса до екватора, зміщення центра симетрії на північ, наявність локальних широтних максимумів, найбільші з яких припадають на $35...40^\circ$ пн. ш. та 10° пд. ш. У розподілі ЗТ по геомагнітних широтах замість кількох максимумів спостерігається лише два: на $22...32^\circ$ пн. ш. та $10...18^\circ$ пд. ш. Положення широтних максимумів $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ добре відповідає положенню максимумів сейсмічності в обох системах координат. Поступове збільшення значень $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ від екватора до полюса та зменшення $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ майже до нуля поблизу геомагнітного екватора пояснюється залежністю механізму формування іоносферного ефекту від вертикальної складової геомагнітного поля, а також, як відзначено вище, значним зменшенням регулярних значень ПЕВ при наближенні до аврального овалу.

Підсилення сейсмо-іоносферного ефекту в зонах серединно-океанічних хребтів і сейсмоактивних поясах демонструє рис. 6. На рисунку показано довготну залежність вказаного ефекту уздовж географічної широти 40° , що припадає приблизно на широту максимальних значень сейсмо-іоносферного ефекту (див. рис. 3). Максимуми спостерігаються на довготах Середин-

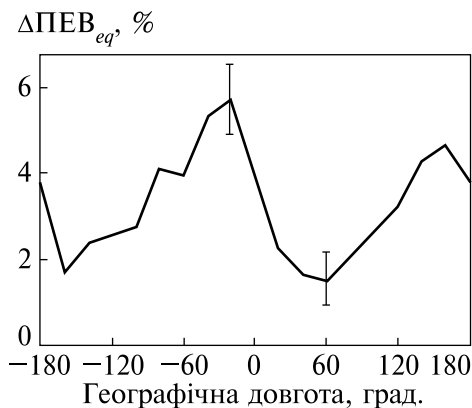


Рис. 6. Довготна залежність сейсмо-іоносферного ефекту на $\varphi = 40^\circ$ пн. ш.

но-Атлантичного хребта ($\sim 30^\circ$ зх. д.) та сейсмічного поясу поблизу Японських островів та прилеглої акваторії Тихого океану ($140...150^\circ$ сх. д.), що добре відповідають зонам підвищених потоків глибинних газів. Для більш детальної оцінки просторової неоднорідності сейсмо-іоносферного ефекту розглянемо планетарний розподіл локальних аномалій $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$, отриманих після виключення повільних змін $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ з широтою та довготою (рис. 7, верхня панель). Видно, що локальні аномалії вибудовуються у діагональні послідовності («лінеаменти»), частина яких (але не всі) відповідають сейсмічним поясам Землі.

У відомих нам публікаціях просторове положення лінеаментів наведено для окремих територій [2, 7, 20], що не дозволяє використовувати їх для порівняння. Тому розглянемо результати сейсмічної томографії мантії Землі. На нижній панелі рис. 7 наведено просторовий розподіл високошвидкісних та низькошвидкісних аномалій сейсмічних хвиль (зі спрощеннями — лише положення максимумів та мінімумів) за даними [22]. Високошвидкісні аномалії відповідають холоднішим, низькошвидкісні — гарячішим ділянкам мантії. Видно, що тут також наявні діагональні послідовності, основні з яких на рисунку підкреслено тонкими штриховими лініями, що дає підстави вважати іоносферні «лінеаменти» не випадковими та пов'язаними з процесами у твердих оболонках Землі. Між процесами у мантії та аномаліями електронної концентрації в іоносфері — довгий ланцюг складних фізичних

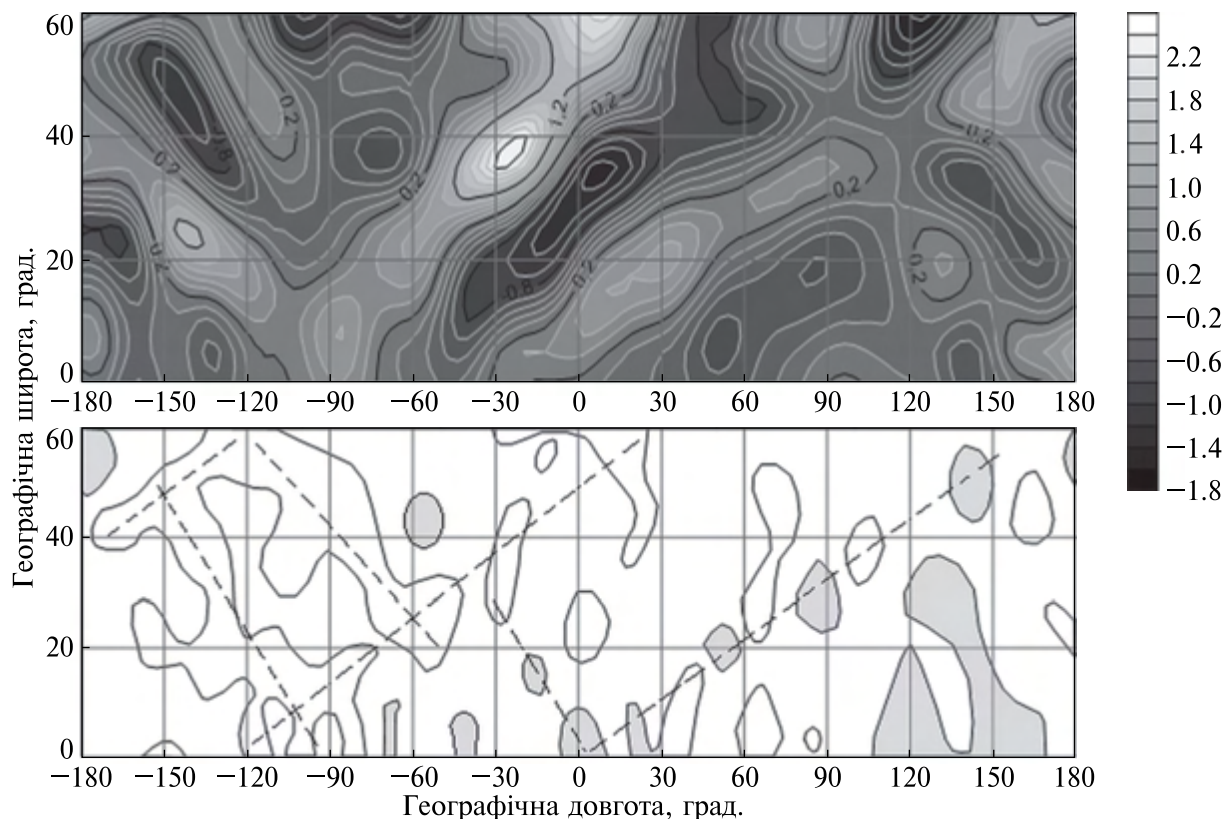


Рис. 7. Діагональні елементи просторового розподілу: зверху — аномалій ПЕВ іоносфери; знизу — позитивних (сірий колір) та негативних (білий колір) аномалій швидкості сейсмічних хвиль у мантії (за даними [22]). Штрихова лінія — основні діагональні елементи

процесів, тому на цьому етапі досліджень обмежимося лише констатацією подібності діагональних елементів у мантії й іоносфері та не будемо проводити їхнього детального зіставлення, тим більше пропонувати уможлидні механізми зв'язку. Відзначимо лише, що потоки глибинних газів, у принципі, можуть залежати від умов у мантії та земній корі, тому глибинний радон — індикатор не лише окремих землетрусів, а цілої низки складних процесів у земних надрах.

Таким чином, усі порівняння свідчать про не-випадковий характер просторових особливостей сейсмо-іоносферного ефекту та його зв'язок з процесами у земній корі. Відзначимо також, що встановлена особливість часових змін ПЕВ під час сейсмічних подій, а саме обов'язкове формування негативних відхилень ПЕВ (по відношенню до фонового рівня) після ЗТ можна пов'язати з тим, що швидкий вихід радону на поверхню

утворює його тимчасовий дефіцит у приповерхневому ґрунті, тому потрібен деякий час для повернення об'ємної активності радону до звичних значень. В осередках сильних ЗТ, як показує рис. 4, б, цей процес більш виражений через значні зміни проникності ґрунту під час ЗТ.

ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати є першою спробою оцінити глобальні іоносферні наслідки сейсмічних подій. Подібні результати у відомих нам наукових публікаціях відсутні, що не дозволяє провести безпосереднє порівняння.

Використання іоносферних карт, що охоплюють значну частину земної кулі, показало: проблема не обмежується власне сейсмо-іоносферною взаємодією, а включає також інші літосферні процеси, які відбуваються в зонах серединно-океанічних хребтів і лінементів, що мар-

кують розломи, зони підвищеної трищівуватості та розушільнення (відповідно, зони підвищеної проникності) земної кори. Єдиним фізичним фактором, що пов'язує ці літосферні об'єкти, є суттєво неоднорідний у просторі та часі потік глибинних газів, насамперед радону. Таким чином, «радоновий» механізм, запропонований раніше для пояснення локальних іоносферних збурень над осередками ЗТ [13, 15, 28, 31], можна розглядати як один із важливих механізмів літосферно-іоносферної взаємодії в цілому. При цьому підвищена об'ємна активність радону може спостерігатися не лише на територіях, що мають відомі літологічні (геологічні) об'єкти (осередки ЗТ, розломи, серединно-океанічні хребти), але й зони підвищеної проникності, які можуть не мати очевидних відповідностей серед геологічних об'єктів. З огляду на різноманітність літосферних об'єктів і процесів, з якими можна пов'язати «радоновий» механізм, він забезпечує *безперервність* процесу літосферно-іоносферної взаємодії з періодичними підсиленнями різного просторового масштабу.

Принципово новим є також розгляд широтної залежності сейсмо-іоносферного ефекту у географічній та геомагнітній системах координат, що виявилася близькою до широтних особливостей сейсмічності. Розглянемо це питання більш детально.

Як вже відзначалося, у середньому кількість ЗТ збільшується від полюсів до екватора, має локальні максимуми на середніх широтах північної півкулі та низьких широтах південної півкулі, а центр симетрії сейсмічності зміщений на північ. Збільшення кількості ЗТ від полюсів до екватора зазвичай пояснюють впливом ротаційного режиму Землі на тектонічні процеси [9, 26, 27], при цьому переважна роль геомагнітної системи координат пояснюється нахилом осі обертання речовин рідкого ядра Землі відносно осі обертання Землі, що проходить через географічні полюси. Зміщення на північ від екватора осі симетрії епіцентрів ЗТ також є результатом впливу геомагнітного поля, а саме відповідним зміщенням центра реального магнітного диполя [26, 27]. Тобто, одні й ті ж фізичні процеси у мантії та ядрі впливають як на формування магнітного

поля Землі, так і на сейсмічність (землетруси як елемент глобального електричного кола [27, 33]).

Встановлені широтні особливості сейсмо-іоносферного ефекту, що добре збігаються з відповідними залежностями кількості ЗТ, ще більше розширюють коло взаємопов'язаних процесів. Фактично проявляється єдиний ланцюг процесів від ядра Землі до іоносфери, що свідчить про єдність усіх шарів як у межах твердої Землі, так і в різних шарах її повітряної оболонки, про єдність процесів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера [18, 21].

Складніше пояснити зменшення кількості ЗТ поблизу екватора. Якби сейсмічний та, як наслідок, сейсмо-іоносферний ефект контролювалися лише ротаційним режимом рідкого ядра [9, 26, 27], вісь обертання якого нахилена по відношенню до осі обертання Землі, слід було б очікувати максимальних ефектів на геомагнітному екваторі. Наявність максимумів, зміщених від екватора до середніх широт, може бути результатом впливу зовнішніх сил. Зокрема, розподіл енергії по широті у твердій оболонці Землі демонструє максимуми на широтах $\pm 45^\circ$ для припливних сил і на широтах $\pm 23^\circ$ для прецесії та коливань полюса, тоді як у районі екватора теорія передбачає локальний мінімум [12, 35].

Але наведені вище теоретичні результати стосуються твердої оболонки Землі в географічній системі координат, тому вони не пояснюють повною мірою провідну роль геомагнітної системи координат у сейсмічних процесах. Тому можна припустити інший механізм — наявність у земному ядрі кільцевого струму уздовж геомагнітного екватора (екваторіальний електроджет) у дипольному геомагнітному полі, який знижує потік глибинних газів з ядра у мантію. Оскільки глибинні гази розглядаються як важливий чи навіть визначальний чинник тектонічних процесів у земній корі, що завершуються землетрусом [10, 23, 32], це призведе до відносної сейсмічної «тиші» уздовж геомагнітного екватора. Такий екваторіальний електроджет може бути елементом механізму формування магнітного поля Землі чи зумовлений іншими процесами, зокрема, розбіжністю кутової швидкості рідкого та твердого ядер Землі по відношенню до нижньої

мантії [30], що призведе до появи процесів їхньої взаємодії.

Останнім часом вказаним процесам взаємодії на межі мантія — зовнішнє ядро та внутрішнього та зовнішнього ядра приділяється багато уваги. За умови несферичності оболонки і ексцентричності положення земного ядра ці процеси не лише стають вагомим джерелом припливу тепла з надр Землі, але й забезпечують ефективне збудження системи оболонки зовнішнім гравітаційним впливом [1, 8, 11]). На думку автора роботи [1], лише так можна пояснити циклічний характер тектонічних та інших природних процесів, що черпають енергію земних надр. Якщо залежність процесів у ядрі та нижній мантії від зовнішнього впливу буде підтверджено подальшими дослідженнями, це певною мірою розміє поділ процесів на ендогенні та екзогенні, оскільки ендогенні процеси несуть на собі ритми екзогенних процесів.

Як бачимо, розгляд такого окремого питання, як сейсмо-іоносферний ефект, привів нас до питання взаємодії всіх земних оболонки, від ядра до верхньої атмосфери та магнітосфери, а також до можливої їхньої залежності від зовнішніх (космічних) чинників. Отримані результати дають вагомий підтвердження точки зору, що Земля разом з її оболонками (підсистемами) та навколоземне середовище утворюють єдину природну відкриту нелінійну систему [18, 21]. При цьому мова йде не лише про обмін енергією між підсистемами, але й про наявність спільних чинників, що визначають динаміку різних оболонки Землі.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження з використанням карт ПЕВ іоносфери демонструють, що сейсмо-іоносферний ефект має загальнопланетарний характер. Часові варіації ПЕВ поблизу моментів сильних ЗТ (глобальний ефект) складаються з двох максимумів: передвісника та «афтершокового» максимуму. У варіаціях над осередками ЗТ реєструється лише передвісник, максимум після ЗТ зазвичай відсутній. У нічні години зміни ПЕВ над

осередками ЗТ приблизно вдвічі більші (у середньому до 8 %), ніж удень. Завжди (локально та глобально) за позитивним сплеском ПЕВ протягом кількох діб спостерігаються зменшені значення ПЕВ. Час прояву передвісника — від 1 до 6 діб до ЗТ, переважно за дві доби до ЗТ.

2. Зона максимальної амплітуди сейсмо-іоносферного ефекту припадає на середні широти, особливо 35...40° пн. ш., а у межах цієї зони — на довготи поблизу 30° зх. д. (Серединно-океанічний хребет) та 140...150° сх. д. (Японські острови та прилегла акваторія Тихого океану).

3. Широтні варіації амплітуди сейсмо-іоносферного ефекту добре збігаються з широтним розподілом ЗТ як у географічній, так і геомагнітній системах координат. Зміни кількості ЗТ та, відповідно, ефекту в іоносфері за геомагнітними координатами більш впорядковані, що свідчить про важливий вплив на сейсмічність тих самих процесів на межі рідкого ядра та нижньої магнії, які зумовлюють формування магнітного поля Землі.

4. Крім сейсмічних поясів та зон серединно-океанічних хребтів, зростання ПЕВ зафіксовано уздовж так званих лінеаментів, що маркують ослаблені зони земної кори з підвищеним потоком глибинних газів. Отримані результати свідчать на користь «радонового» механізму сейсмо-іоносферного ефекту та опосередковано підтверджують роль цього процесу у формуванні загальнопланетарних особливостей сейсмічності.

5. Отримані результати, разом з відомими даними про широтний розподіл землетрусів, свідчать про єдність процесів від земного ядра до навколоземного простору.

Роботу 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 також частково підтримувалась у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0121U109882).

ЛІТЕРАТУРА

1. Баркин Ю. В. Объяснение эндогенной активности планет и спутников и ее цикличности, *Изв. Рос. акад. естеств. наук, сек. наук о Земле*. 2002. Вып. 9. С. 45—97.
2. Бондур В. Г., Зверев А. Т. Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий. *Совр. пробл. дистан. зондирования Земли из космоса*. 2006. 2, Вып. 3. С. 177—183.
3. Войтов Г. И. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли. *Теор. и региональные проблемы геодинамики. Тр. Геолог. ин-та РАН*. 1999. Вып. 515. С. 242—251.
4. 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.
5. Добровольский И. П. *Теория подготовки тектонического землетрясения*. Москва: Наука, 1991. 224 с.
6. Захаров І. Г., Черногор Л. Ф. Вплив глобальної сейсмічної активності на процеси в атмосфері й іоносфері. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 5. С. 19—34. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.000>.
7. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон. *Физ. Земли*. 2004. № 10. С. 95—111.
8. Левин Б. В. Роль движений внутреннего ядра Земли в тектонических процессах. *Фундаментальные проблемы общей тектоники*. Москва: Науч. мир, 2001. С. 444—460.
9. Левин Б. В., Чирков Е. Б. Особенности широтного распределения сейсмичности и вращение Земли. *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 6. С.65—69.
10. Летников Ф. А. Дегазация земли как глобальный процесс самоорганизации. *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы междунар. конф.* Москва: ГЕОС, 2002. С. 6—7.
11. Летников Ф. А. Об одном из возможных источников тепловой энергии эндогенных процессов Земли. *ДАН*. 2004. 398, № 6. С. 792—794.
12. Павлов В. П. Теория возмущения для тензора напряжений в Земле. *Теор. и мат. физика*. 2004. 141, № 4. С. 117—130.
13. Пулинец С. А., Узун 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. *Геомagnetизм и аэрономия*. 2015. 55, № 4. С. 1—19. DOI: 10.7868/S0016794015040136.
14. Сайт VolcanoDiscovery. URL: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/global-seismic-activity-level.html/> (дата звернення: 27.04.2022).
15. Спивак А. А., Кожухов С. А., Сухоруков С. В., Харламов В. А. Эманация радона как индикатор интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе земная кора – атмосфера. *Физ. Земли*. 2009. № 2. С. 34—48.
16. Сывороткин В. Л. *Озоновый слой, дегазация Земли, рифтогенез и глобальные катастрофы*. Москва: Геоинформмарк, 1994. 68 с.
17. Тertyshnikov A. V. Оценка практической значимости геомагнитных предвестников сильных землетрясений. *Гелиогеофиз. исслед.* 2013. Вып. 3. С. 63—70.
18. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. 8, № 1. С. 59—106.
19. Черногор Л. Ф. Возможность генерации квазипериодических магнитных предвестников землетрясений. *Геомagnetизм и аэрономия*. 2019. 59, № 3. С. 400—408. DOI: 10.1134/S0016794019030064.
20. Arellano-Baeza A. A., Zverev A. T., Malinnikov V. A. Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data. *Adv. Space Res.* 2006. 37, № 4. P. 690—697.
21. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an open nonlinear dynamical system. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2008. 13, № 2. P. 120—137.
22. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in the Earth’s mantle. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2003. 205. P. 295—308.
23. Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth’s crust. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. 2, № 4. P. 378—415. DOI:10.5800/GT2011240051.
24. Heki K. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 2011. 38. L17312. DOI:10.1029/2011GL047908.
25. Hobara Y., Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2005. 67. P. 677—685. DOI:10.1016/j.jastp.2005.02.006.
26. Khachikjan G. Spatial earthquake statistics in geomagnetic coordinates. *Proc. Int. earthquake symp.* Kocaeli, Turkey. 2009. С. 407—413. URL: <http://kocaeli2009.kocaeli.edu.tr/fullpaper09.pdf> (дата звернення: 27.04.2022).

27. Khachikyan G. Ya., Zhakupov N. S., Kadyrhanova N. Zh. Geomagnetic conjugacy of modern tectonic structures. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013. **4**, № 2. P. 187—195. DOI:10.5800/GT2013420097.
28. Liperovsky V. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V., Davidov V. F., Bogdanov V. V. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sci.* 2005. **5**, № 6. P. 783—789. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-5-783-2005>.
29. Liu J. Y., Chen Y. L., Chuo Y. J., Chen C. S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *J. Geophys. Res.* 2006. **111**. A05304. DOI:10.1029/2006.
30. Livermore P. W., Hollerbach R., Jackson A. Electromagnetically driven westward drift and inner-core superrotation in Earth's core. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA (PNAS)*. 2013. Sept. 16. P. 1—5. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1307825110>.
31. Ouzounov D., Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv. Space Res.* 2004. **33**. P. 268—273. DOI:10.1016/S0273-1177(03)00486-1.
32. Pavlenkova N. I. Fluids-rotation conception of global geodynamics. *Bull. Soc. Geol. It.* 2005. *Volume Speciale No. 5*. P. 9—22.
33. Pulnits S.; Khachikyan G. The global electric circuit and global seismicity. *Geosciences*. 2021. **11**. P. 491. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11120491>.
34. Pulnits S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D. From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 earthquake. A look from a 20-year perspective. *Atmosphere*. 2021. **12**, № 262. 16 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos1202026>.
35. Sun W. Seismic energy distribution in latitude and a possible tidal stress. *Phys. Earth and Planet. Interiors*. 1992. **71**. P. 205—216. DOI:10.1016/0031-9201(92)90077-9.
36. Zakharov I. G., Chernogor L. F. Ionosphere as an indicator of processes in the geospace, troposphere, and lithosphere. *Geomagn. Aeron.* 2018. **58**, № 3. P. 430—437. DOI:10.1134/S0016793218030167.

REFERENCES

1. Barkin Yu. V. (2002). Explanation of the endogenous activity of planets and satellites and its cyclicity, *Izvestiya Rus. Acad. Natural Sci., Geosci. Section*, **9**, 45—97 [in Russian].
2. Bondur V. G., Zverev A. T. (2006). Physical nature of lineaments recorded on space images during monitoring of seismically hazardous areas. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, **2**, № 3, 177—183 [in Russian].
3. Voitov G. I. (1999). On cold degassing of methane into the Earth's troposphere. *Teor. and regional problems of geodynamics. Trudy Geolog. In-te Rus. Acad. Sci.*, is. 515. Moscow: Nauka, 242—251 [in Russian].
4. Gorkavy N. N., Trapeznikov Yu. A., Fridman A. M. (1994). On the global component of the seismic process and its relationship with the observed features of the Earth's rotation. *Doklady Rus. Acad. Sci., Geophysics*, **338**, № 4, 525—527 [in Russian].
5. Dobrovolsky I. P. (1991). *Theory of tectonic earthquake preparation*. Moscow: Nauka, 224 p. [in Russian].
6. Zakharov I. G., Chornogor L. F. (2021). Influence of global seismic activity on processes in the atmosphere and ionosphere. *Space Science and Technology*, **27**, № 5, 19—34 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.000>.
7. Kuzmin Yu. O. (2004). Modern geodynamics of fault zones. *Physics of the Earth*, **10**, 95—111 [in Russian].
8. Levin B. V. (2001). *The role of the Earth's inner core movements in tectonic processes*. Fundamental problems of general tectonics. Moscow: Scientific world Publ., 444—460 [in Russian].
9. Levin B. V., Chirkov E. B. (1999). Latitudinal distribution of seismicity features and the rotation of the Earth. *J. Volcanology and Seismology*, **6**, 65—69 [in Russian].
10. Letnikov F. A. (2002). Earth degassing as a global process of self-organization. *Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil and gas (Proc. of the Int. Conf.)*. Moscow: GEOS Publ., P. 6—7 [in Russian].
11. Letnikov F. A. (2004). About one of the possible sources of thermal energy of endogenous processes of the Earth. *Doclady Rus. Acad. Sci.*, **398**, № 6, 792—794 [in Russian].
12. Pavlov V. P. (2004). Perturbation theory for the stress tensor in the Earth. *Theor. and Mat. Physics*, **141**, № 4, 117—130 [in Russian].
13. Pulnits S. A., Ouzounov D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. (2015). Physical bases of the generation of short term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system. *Geomag. Aeron.*, **55**, № 4, 521—538. DOI:10.1134/S0016793215040131.
14. Volcanodiscovery. URL: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/global-seismic-activity-level.html> (Last accessed: 27.04.2022).
15. Spivak A. A., Kozhukhov S. A., Sukhorukov S. V., Kharlamov V. A. (2009). Radon emanation as an indicator of the intensity of intergeospheric interactions at the Earth's crust-atmosphere interface. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, **45**, 118—133 [in Russian].
16. Syvorotkin V. L. (1994). *Ozone Layer, Earth Degassing, Rifting and Global Catastrophes*. Moscow: Geoinformmark Publ., 68 p. [in Russian].

17. Tertyshnikov A. V. (2013). Estimation of the practical significance of geomagnetic precursors of strong earthquakes. *Helio-geophysical Res.*, **3**, 63–70 [in Russian].
18. Chernogor L. F. (2003). Physics of the Earth, atmosphere and geocosmos in the light of the systemic paradigm. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **8**, № 1, 59–106 [in Russian].
19. Chernogor L. F. (2019). Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagn. Aeron.*, **59**, № 3, 374–382. DOI: 10.1134/S001679321903006X.
20. Arellano-Baeza A. A., Zverev A. T., Malinnikov V. A. (2006). Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data. *Adv. Space Res.*, **37**, № 4, 690–697.
21. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008). Earth — Atmosphere — Geospace as an open nonlinear dynamical system. *Radio Physics and Radio Astronomy*. **13**, № 2. P. 120–137.
22. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. (2003). Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **205**, 295–308.
23. Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N. (2011). Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodynamics & Tectonophysics*, **2**, № 4, 378–415. DOI: 10.5800/GT2011240051.
24. Heki K. (2011). Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L17312. DOI: 10.1029/2011GL047908.
25. Hobara Y., Parrot M. (2005). Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **67**, 677–685. DOI:10.1016/j.jastp.2005.02.006.
26. Khachikjan G. (2009). Spatial earthquake statistics in geomagnetic coordinates. *Proc. of Intern. earthquake symposium. Kocaeli. Turkey*, 407–413. URL: <http://kocaeli2009.kocaeli.edu.tr/fullpaper09.pdf> (Last accessed: 27.04.2022).
27. Khachikyan G. Ya., Zhakupov N. S., Kadyrkhanova N. Zh. (2013). Geomagnetic conjugacy of modern tectonic structures. *Geodynamics & Tectonophysics*, **4**, № 2, 187–195. DOI: 10.5800/GT2013420097.
28. Liperovsky V. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V., Davidov V. F., Bogdanov V. V. (2005). On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sci.*, **5**, № 6, 783–789. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-5-783-2005>.
29. Liu J. Y., Chen Y. I., Chuo Y. J., Chen C. S. (2006). A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *J. Geophys. Res.*, **111**, A05304. DOI: 10.1029/2006.
30. Livermore P. W., Hollerbach R., Jackson A. (2013). Electromagnetically driven westward drift and inner-core superrotation in Earth's core. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA (PNAS)*, Sept. 16, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1307825110>.
31. Ouzounov D., Freund F. (2004). Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv. Space Res.*, **33**, 268–273. DOI:10.1016/S0273-1177(03)00486-1.
32. Pavlenkova N. I. (2005). Fluids-rotation conception of global geodynamics. *Bull. Soc. Geol. It. Volume Speciale*, **5**, 9–22.
33. Pulinets S., Khachikyan G. (2021). The global electric circuit and global seismicity. *Geosciences*, **11**, 491. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11120491>.
34. Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D. (2021). From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 earthquake. A look from a 20-year perspective. *Atmosphere*, **12** (262), 16 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos1202026>.
35. Sun W. (1992). Seismic energy distribution in latitude and a possible tidal stress. *Phys. Earth and Planet. Interiors*, **1**, 205–216. DOI: 10.1016/0031-9201(92)90077-9.
36. Zakharov I. G., Chernogor L. F. (2018). Ionosphere as an indicator of processes in the geospace, troposphere, and lithosphere. *Geomagn. Aeron.*, **58**, № 3, 430–437. DOI: 10.1134/S0016793218030167.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2022

Після доопрацювання 24.05.2022

Прийнято до друку 25.05.2022

Received 13.05.2022

Revised 24.05.2022

Accepted 25.05.2022

I. G. Zakharov, Senior Researcher, PhD in Phys.&Math., Winner of USSR Council of Ministers Prize

E-mail: giz-zig@ukr.net

L. F. Chernogor, Head of the Department of Space Radiophysics, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor

ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

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

V. N. Karazin Kharkiv National University

4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

GLOBAL AND LOCAL EFFECTS OF SEISMIC ACTIVITY IN THE IONOSPHERE

We considered ionospheric effects of powerful seismic events using total electron content (TEC) maps of the ionosphere (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>) for the northern hemisphere, except the polar region, in the winter seasons of 2012–2018. It is shown that the seismic-ionospheric effect is global, which is superimposed by local effects over the epicenters of individual earthquakes (EQ). Temporal TEC variations near the time of strong EQs at a great distance from their epicenters (global effect) consist of two maxima: the precursor and the «aftershock» maximum. In TEC variations over the EQ epicenter (local effect), only a precursor is usually registered, the amplitude of which at night (on average, ~ 8 %) is about twice as high as during the day. Always (locally and globally) after a positive surge in TEC, its reduced values are observed for several days. The maximum amplitude zone of the seismic-ionospheric effect belongs to the middle latitudes, especially 35...40° N, and within this zone at longitudes near 30° W (Mid-Atlantic ridge) and 140...150° E (Japanese islands and adjacent waters of the Pacific Ocean). Latitudinal amplitude maxima of the seismic-ionospheric effect are in good agreement with the latitudinal maxima of the EQ number in both geographic and geomagnetic coordinate systems. Changes in the EQ number and, consequently, the effect in the ionosphere on geomagnetic coordinates are more ordered, which indicates a significant impact on the seismicity of the same processes at the boundary of the liquid core and lower mantle, which form the Earth's magnetic field. In addition to seismic belts and zones of mid-ocean ridges, an increase in TEC has been recorded along the so-called lineaments, marking the weakened zones of the Earth's crust with increased flows of deep gases. The correspondence between the spatial features of seismicity and the seismic-ionospheric effect testifies in favor of the «radon» mechanism of lithosphere-ionosphere coupling and indirectly confirms the role of deep gases in the formation of seismicity planetary features.

Keywords: ionosphere, seismicity, total electron content, lithosphere-ionosphere coupling, local perturbations, global perturbations.