

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.130>
УДК 551.510.535:551.59:551.2

І.Г. Захаров, Л.Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: giz-zig@ukr.net

ВПЛИВ ГЛОБАЛЬНОЇ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА ПАРАМЕТРИ ІОНОСФЕРИ ТА ПРИЗЕМНОЇ АТМОСФЕРИ

Предмет і мета роботи. Актуальність досліджень зумовлена необхідністю попередження несприятливого впливу природних збурень на людину. Вплив процесів у літосфері на стан атмосфери та іоносфери під час землетрусів (ЗТ) активно вивчається у сучасних дослідженнях. Однак майже всі дослідження проводилися поблизу осередків ЗТ, незважаючи на глобальний характер сейсмічного процесу. Мета роботи — аналіз змін тиску і температури приземної атмосфери та повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери на довільній відстані від осередків потужних ЗТ.

Методи та методологія. Використано дані для 40° пн. ш. з карт ПЕВ іоносфери, карт тиску і температури приземної атмосфери. Розрахунки проведено методом накладених епох. Як «нульові» використано дні потужних ЗТ з магнітудою від 6.3 до 7.9 балів за шкалою Ріхтера незалежно від їх координат. Дослідження проведено для зимових сезонів 2012–2018 рр.

Результати. Приземний тиск P_0 був знижений протягом приблизно п'яти днів напередодні ЗТ і підвищений протягом п'яти днів після нього. Температура повітря T змінюється у протифазі. Значення ПЕВ різко зростають за два-п'ять днів напередодні ЗТ. Типові значення відхилень складають: ΔP_0 — до 2 гПа, ΔT — до 0.3 К, Δ ПЕВ — 3...4 %. Поблизу довгот, які припадають на межі літосферних плит, відхилення збільшується майже вдвічі. Амплітуда ефекту вище над регіонами зі знизженим атмосферним тиском. Установлені закономірності свідчать про важливу роль дегазації земних надр у літосферно-атмосферних та літосферно-іоносферних ефектах. Основну роль відіграють потоки радону, що викликають іонізацію приземного повітря та ініціюють низку вторинних процесів.

Висновки. Результати роботи свідчать про наявність атмосферних та іоносферних ефектів, викликаних літосферними процесами, на довільній відстані від осередків потужних землетрусів і вказують на важливу роль дегазації земних надр як первинного чинника цих глобальних ефектів.

Ключові слова: землетрус, радон, атмосферний тиск, повний електронний вміст, літосферно-атмосферно-іоносферна взаємодія.

Вступ

Атмосферні та іоносферні збурення під час землетрусів (ЗТ) є предметом багатьох сучасних досліджень. Як джерела збурень розглядають ва-

ріації певних геофізичних параметрів поблизу осередків ЗТ: деформації земної поверхні, збільшення потоку глибинних газів (у тому числі радіоактивних), підвищення температури надр,

Цитування: Захаров І.Г., Черногор Л.Ф. Вплив глобальної сейсмічної активності на параметри іоносфери та приземної атмосфери. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28. № 2. С. 130–142. <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.130>

Citation: Zakharov, I.G., Chernogor, L.F., 2023. Influence of global seismic activity on ionosphere and near-earth atmosphere parameters. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 28(2), pp. 130–142. <https://doi.org/10.15407/rpra28.02.130>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

електромагнітні явища та ін. Через велику кількість робіт з цієї тематики обмежимося лише прикладами.

Засобами супутникового моніторингу напередодні та після ЗТ багаторазово були зареєстровані потоки інфрачервоного випромінювання над осередками ЗТ та навколо них, переважно протягом п'яти діб напередодні ЗТ [1–4]. Одночасні вимірювання на супутнику, поблизу земної поверхні та під нею показали [5], що джерело випромінювання знаходиться під землею. Поява додаткового джерела тепла призводила також до зниження приземного атмосферного тиску (ПАТ).

Виділення тепла відбувалося у вигляді прихованої теплоти випаровування, а центрами конденсації для вологи ставали іони, що утворювалися в результаті іонізації потоками радону [6]. Навіть незначне збільшення концентрації радону підвищує швидкість іонізації до значень, достатніх для макроскопічних змін в атмосфері [7]. У процесі перемішування атмосфери відбувається збільшення просторового масштабу аномалії [8] до сотень тисяч квадратних кілометрів.

Зміни ПАТ, температури та вологості повітря, об'ємної активності радіоактивних газів торону та радону зареєстровані перед ЗТ у дослідженні [9]. Дослідження проведено в межах зони деформацій з радіусом $R_d = e^M$ (км), де M — магнітуда ЗТ [10], яка зазвичай приймається як зона прояву провісників ЗТ. Автори пояснюють результати тим, що при проходженні атмосферного фронту зниження ПАТ призводить до посиленого відсмоктування газів з приповерхневих шарів земної кори. Цей ефект добре відомий [11] і використовується, зокрема, для оцінки накопичення радіоактивного радону в житлових приміщеннях. З наведеного пояснення випливає, що за відсутності змін ПАТ збільшення потоку глибинних газів також не спостерігатиметься.

У роботі [12] зафіксоване аномальне підвищення зимової температури повітря під впливом геодинамічних процесів. У цьому випадку їх чинником виступають техногенні процеси поблизу греблі ГРЕС (за наявності великого розлому в зоні дослідження).

Сейсмічні процеси супроводжуються змінами в іоносфері у вигляді рухомих іоносферних збурень і локальних аномалій електронної кон-

центрації (N_e). У першому випадку для спостережень широко використовують вимірювання повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери (див., наприклад, [13]). Зазвичай, реєструються рухомі збурення ПЕВ з амплітудою до 0.5 TECU, рідко — до 2 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ ел/м}^{-2}$), зі швидкостями 120...270, 500...1200 та 2000...3200 м/с. Збурення фіксуються на відстанях до 500 км від епіцентру ЗТ. Локальні просторові аномалії N_e , зафіксовані іонозондами та на супутниках *in situ*, та ПЕВ (за сигналами навігаційних супутників) над і поблизу епіцентру ЗТ, можуть бути позитивними та негативними, амплітуда аномалії — від ~5 до кількох десятків відсотків. Як і для метеорологічних параметрів, аномалії N_e зазвичай починають реєструватися за п'ять діб до головного поштовху (див., наприклад, [14–20]).

Як механізм сейсмо-іоносферного ефекту розглядають генерацію над областю ЗТ і поширення акустико-гравітаційних хвиль (АГХ), а також модифікацію електричних полів і струмів, викликаних електричними процесами в літосфері або у приземній атмосфері (див., наприклад, [21]). Джерелом АГХ виступають різкі поштовхи земної кори під час ЗТ.

Механізми формування аномального електричного поля на межі «земля—повітря» не так очевидні. Найчастіше розглядають формування поверхневого позитивного заряду за рахунок «діркової» провідності (стрикційний механізм) [22] та іонізацію приземного шару атмосфери змінами природної радіоактивності, основним джерелом якої є вихід на поверхню глибинного радону і його продуктів у сейсмоактивних регіонах [19, 23, 24].

Слід нагадати, що сейсмічний процес зараз розглядають як глобальний безперервний самоорганізований тектонічний процес з періодами накопичення та релаксації тектонічних напружень [25–27], що проявляється змінами у багатьох геофізичних полях. Далі сукупність цих процесів будемо називати глобальною сейсмічною активністю (ГСА). Глобальний характер сейсмічного процесу дозволяє поставити питання про можливість змін в іоносфері та приземній атмосфері на довільній відстані від осередків ЗТ. Глобальні сейсмічні ефекти раніше вже розглядалися в роботах [28, 29], але з використанням даних окремих станцій спостереження. У цій роботі за

основу взяті дані з метеорологічних та іоносферних карт, що дозволило дослідити просторові особливості літосферно-атмосферно-іоносферних зв'язків.

Мета роботи — аналіз змін тиску і температури приземної атмосфери та ПЕВ іоносфери під час різкого зростання ГСА на довільній відстані від осередків потужних ЗТ.

1. База даних та методи аналізу

Дослідження проведено для зимових сезонів 2012—2018 рр., що охоплюють інтервал часу від максимуму до мінімуму 24-го 11-річного сонячного циклу. Обмеження тільки зимовим періодом зумовлене тим, що як метеорологічні, так і йоносферні процеси значно відрізняються у різні пори року.

Як характеристику іоносферних процесів використано дані про ПЕВ іоносфери, отримані за вимірюваннями сигналів навігаційних супутників системи GPS. Реєстрація ПЕВ на похилих траєкторіях дозволяє будувати глобальні карти ПЕВ не лише над суходолом, але й над акваторією майже без застосування інтерполяції. Карти ПЕВ розраховуються кожні 1—2 години (залежно від року спостереження). У цій роботі використані дані для 40° пн. ш. з кроком 5 градусів за довготою з глобальних карт ПЕВ — Global Ionospheric Maps — з сайту <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>. Широту 40° пн. ш. було обрано для максимального зменшення впливу космічної погоди на іоносферу, який найбільше проявляється на високих та екваторіальних широтах. Для виключення залежності ПЕВ від часу доби використано середньодобові значення. Нижче значення ПЕВ наведені в одиницях $0.1 \text{ TECU} = 10^{15} \text{ м}^{-2}$.

Для оцінки наявності впливу літосфери на іоносферу на тлі безперервно діючих факторів космічної погоди використані дані про сонячну (густина потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$) і геомагнітну (індекс A_p) активності з сайту <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/>.

Для оцінки процесів у нижній атмосфері використано карти (сіткові дані, *англ.* gridded data) приведені до рівня моря атмосферного тиску (P_0) і температури приземної атмосфери (T) на рівні 1 000 гПа з метеорологічного сайту <https://psn.noaa.gov> на 40° пн. ш. з кроком 10 градусів за

довготою. Для порівняння використані дані про температуру та тиск приземної атмосфери окремих континентальних метеорологічних станцій поблизу 50° пн. ш. з сайту www.gismeteo.ru за 1998—2015 рр., а саме станцій (у дужках наведена довгота): Плімут (4.1° зх. д.), Прага (14.4° сх. д.), Харків (36.3° сх. д.), Караганда (73.2° сх. д.), Улан-Уде (107.6° сх. д.), Хабаровськ (135.1° сх. д.), Ванкувер (123.1° зх. д.), Тандер-Бей (89.2° зх. д.), Сент-Джонс (52.7° зх. д.).

Розрахунки проведено методом накладених епох з оцінкою статистичної достовірності результату за непараметричним критерієм Фрідмана [30]. Як «нульові» використано дні різкого зростання ГСА після відносного затишшя протягом кількох діб поспіль (так звані «ізолювані» сейсмічні події, що дозволяють уникнути накладення ефектів від двох та більше послідовних подій). Для оцінки ГСА використано максимальну за добу магнітуду ЗТ за шкалою Ріхтера (M_{max}) на земній кулі, незалежно від його координат, з використанням даних з сайту <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>. Усього виділено 24 ізолювані події зростання ГСА зі значеннями M_{max} від 6.3 до 7.9 балів. Використано також кореляційний аналіз.

2. Результати

Протягом інтервалів часу, що досліджувалися (± 10 днів від реперного дня), сейсмічна активність мала типові для цього явища риси із ЗТ уздовж меж тектонічних плит. Найбільш потужні ЗТ, обрані для дослідження, окрім одного, відбулися переважно в екваторіальній зоні на відстані більше ніж 1 000 км від 40° пн. ш. Оскільки використані атмосферні та іоносферні дані охоплюють усі довготи, навіть для єдиного ЗТ поблизу 40° пн. ш. переважна більшість точок спостереження знаходяться далеко за межами зони деформацій R_d [10].

Оскільки нас цікавлять перш за все глобальні зміни, розглянемо спочатку усереднені вздовж 40° пн. ш. зміни параметрів іоносфери та приземної атмосфери.

Приземний атмосферний тиск почав знижуватися приблизно за п'ять днів до зростання ГСА, а поблизу «нульової» дати — почав зростати (рис. 1). Температура приземної атмосфе-

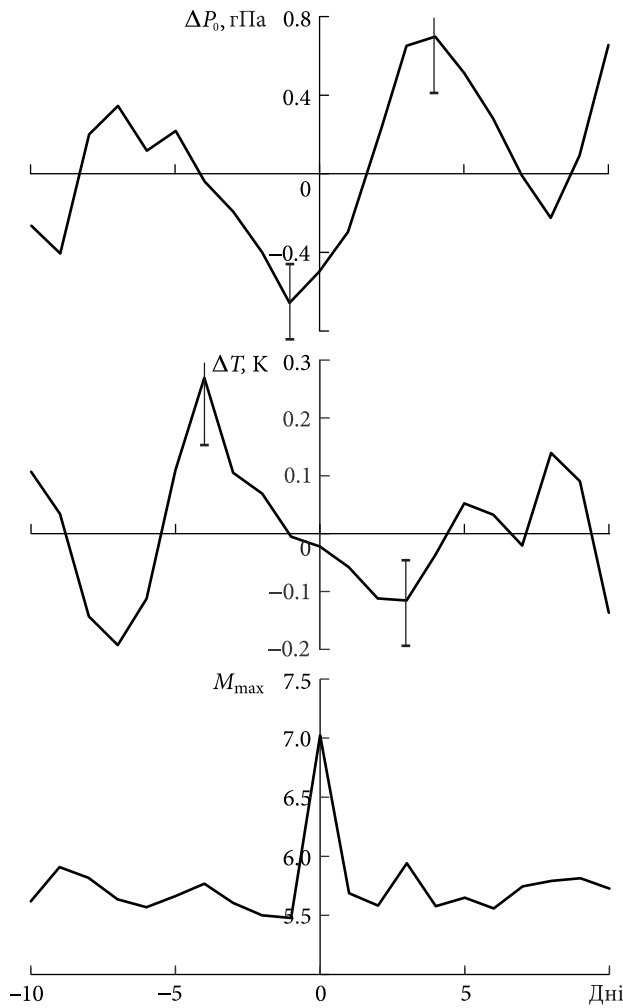


Рис. 1. Зміни тиску і температури приземного повітря у періоди різкого зростання ГСА. Вертикальними відрізками тут і далі показано стандартну похибку розрахунків

ри (ТПА) змінювалася у протифазі. Через кілька днів після зростання ГСА знак варіацій ПАТ та ТПА знову змінився, що, можливо, зумовлено реакцією атмосфери на початкові зміни і не пов'язано безпосередньо з впливом сейсмічних подій.

Різкий сплеск M_{\max} (рис. 1, нижній графік) у «нульовий» день свідчить про те, що співставних за амплітудою ЗТ до та після реперного дня не спостерігалось.

Зміни ПЕВ слідує за змінами сонячної активності (СА), що добре видно з рис. 2 (найбільші значення на краях рисунку). На цьому фоні відбулося зростання ПЕВ за два дні до зростання ГСА та протягом чотирьох днів після ГСА. Отримані зміни ПЕВ не могли бути зумовлені змінами СА, оскільки добре видно, що сонячна активність

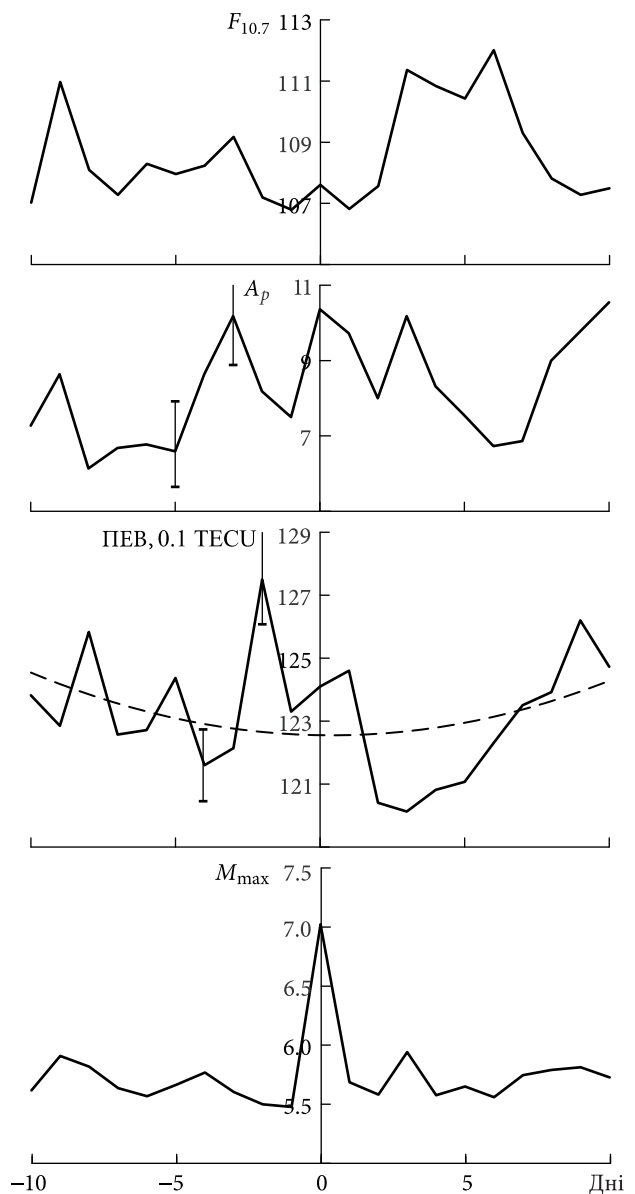


Рис. 2. Зміни показників космічної погоди та іоносфери у періоди різкого зростання ГСА

у ці дні була найнижчою. Водночас відбувалося незначне збільшення геомагнітної активності (ГМА): індекс A_p зріс не більше ніж на 3 одиниці, що відповідає змінам геомагнітного поля до 6 нТл. При цьому ГМА у цілому залишалася низькою, а зареєстрований стрибок A_p є достовірним лише для статистичної значущості $p < 0.1$. Невелике збільшення ГМА у періоди потужних ЗТ фіксувалося авторами, а також іншими дослідниками [28, 31–33], при цьому розглядався як можливий вплив ГМА на ініціацію ЗТ, так і вплив ЗТ на генерацію геомагнітних збурень.

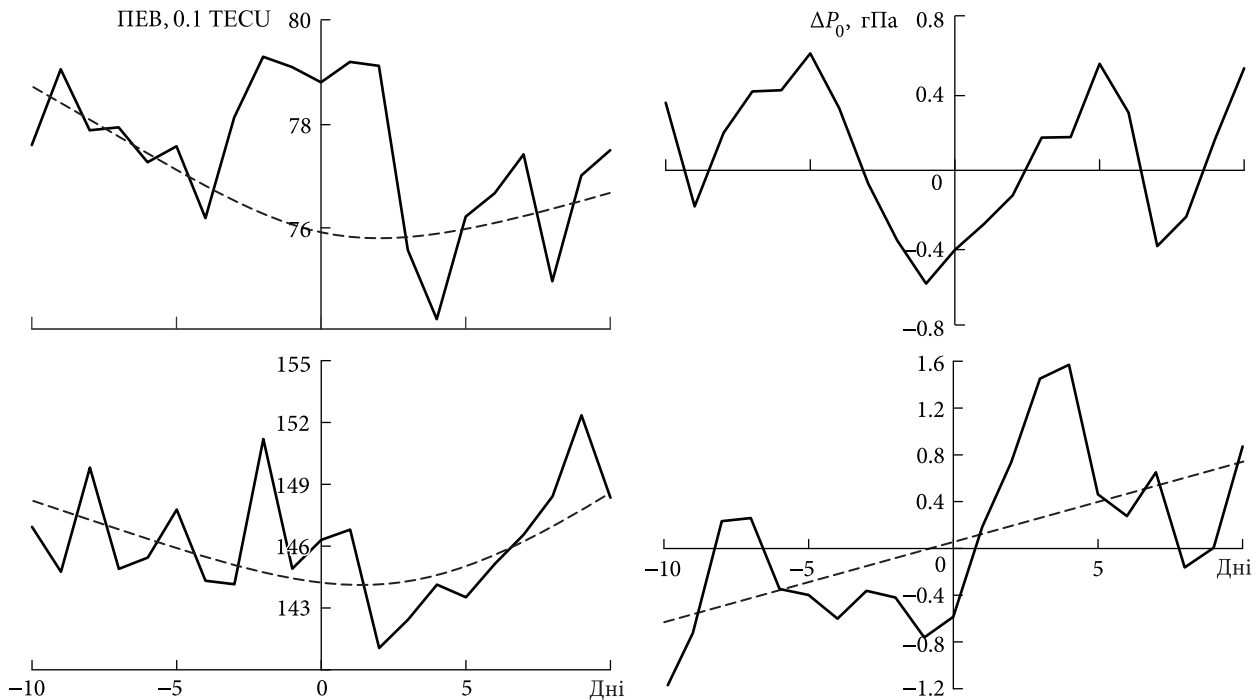


Рис. 3. Зміни ПЕВ іоносфери та ПАТ для двох незалежних груп: угорі — $F_{10.7} < 100$; внизу — $F_{10.7} \geq 100$

Розраховані зміни ПЕВ, ПАТ та ТПА є достовірними ($p < 0.05$). Наочну сталість отриманого результату демонструє подібність результатів розрахунку для двох незалежних груп даних, виділених з первинного масиву за рівнем СА (рис. 3). Амплітуда сейсмічного ефекту ПЕВ в обох випадках складає приблизно 4%. Зміни ПАТ були більше при високому рівні СА, але наявність такої різниці потребує перевірки.

Для додаткової перевірки наявності змін ПАТ і ТПА при зміні ГСА проведено розрахунки для вказаних вище дев'яти метеорологічних станцій поблизу 50° пн. ш. та для M_{\max} від 6.3 до 8.0 балів. Окремо (до середніх значень не включено) розглянуто також реакцію атмосфери на потужний ЗТ з $M = 9$ поблизу о. Суматра 26 грудня 2004 р. Приклад результатів, наведений на рис. 4, демонструє подібність змін ПАТ з наведеними вище. Добре помітно наявність кількох фаз збурення. Оскільки зміни усереднених значень ПАТ і ТПА практично завжди відбуваються у протифазі, тут і далі будемо обмежуватися графічними даними для ПАТ.

Результати розрахунків для ПЕВ добре збігаються з отриманими авторами раніше [29], з використанням даних як про ПЕВ, так і про кри-

тичну частоту області F2 f_0F_2 (п'ять іоносферних станцій) вдалині від осередків ЗТ (рис. 5). Зростанню f_0F_2 передують його поступове зниження.

Аналіз сейсмічних подій з різними значеннями магнітуди ЗТ M_{\max} попередньо показав, що амплітуда коливань ПАТ майже не помітна на фоні шумів для $M_{\max} < 6.3$ і поступово зростає при зростанні M_{\max} . Найбільші значення $\Delta P_0 = 2.6$ гПа (середнє значення для дев'яти станцій в Європі, Азії та Північній Америці) зафіксовані для ЗТ з $M = 9$ поблизу о. Суматра 26 грудня 2004 р. Коливання температури при цьому не перевищували ± 0.5 К.

Розглянемо залежність літосферного ефекту від довготи. Для ПАТ як оцінку амплітуди ефекту, $A(P_0)$, використано половину стрибка ΔP_0 від мінімальних до максимальних значень до та після зростання ГСА (фактично — середню амплітуду негативного та позитивного викидів ПАТ), для ПЕВ — $A(\text{TEC})$ — величину зростання ПЕВ відносно останнього незбуреного значення. Оскільки ПЕВ має значні довготні варіації (більш ніж 30%), $A(\text{TEC})$ виражена у відсотках. Видно (рис. 6, ліва панель), що довготні залежності $A(P_0)$ та $A(\text{TEC})$ подібні, що підтверджується достовірним коефіцієнтом кореляції $r = +0.58$

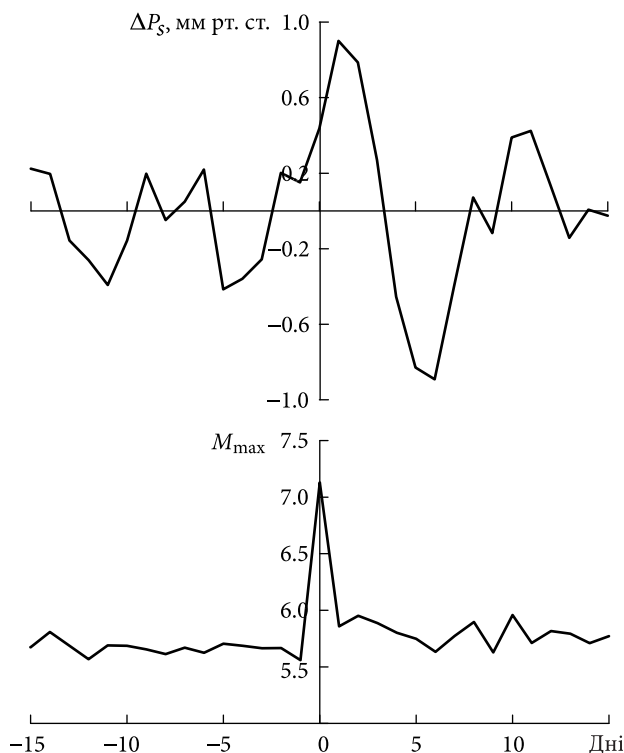


Рис. 4. Зміни ПАТ поблизу 50° пн. ш. у періоді різкого зростання ГСА; кількість сейсмічних подій $n = 59$

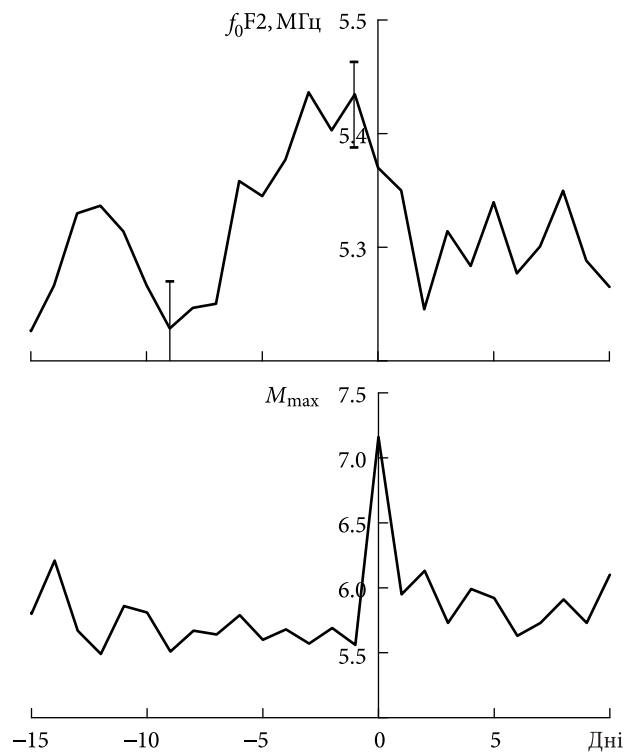


Рис. 5. Зміни f_0F_2 (2007–2015 рр.) у періоді різкого зростання ГСА; кількість сейсмічних подій $n = 44$ [29]

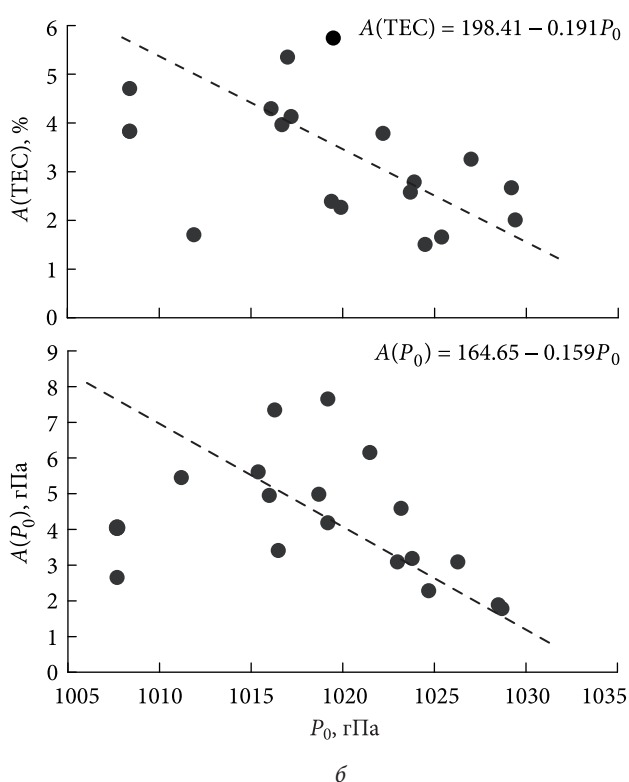
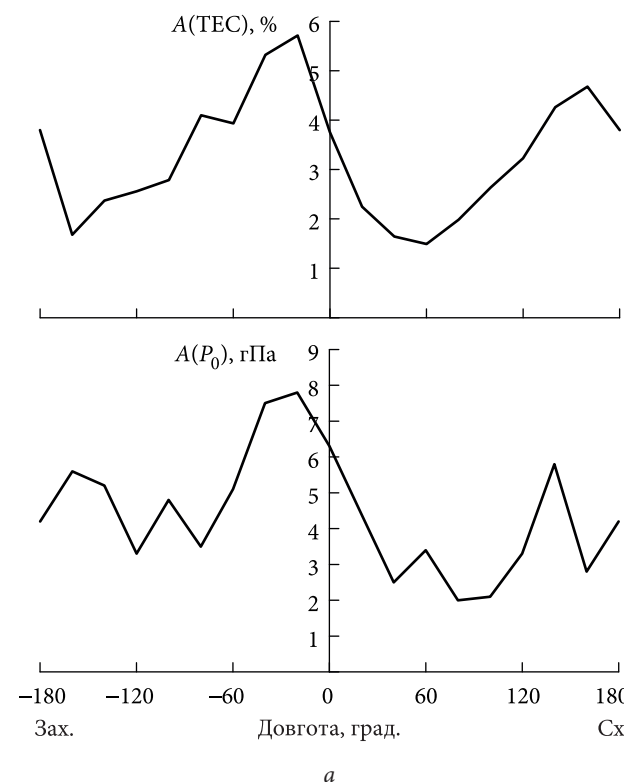


Рис. 6. Амплітуда літосферного ефекту в іоносфері та атмосфері: a — довготна залежність; b — залежність від ПАТ

($p < 0.01$) між ними. Максимальний ефект спостерігається на довготах $20^\circ \dots 40^\circ$ зх. д.; другий за величиною довготний максимум – на 140° сх. д. (для ПЕВ в інтервалі $140^\circ \dots 180^\circ$ сх. д.).

Крім того, як атмосферний, так і йоносферний ефекти характеризуються спадною залежністю від приземного тиску (рис. 6, права панель). Точки, що найбільше відхиляються вправо та вліво від регресійної лінії, не є випадковими і відносяться до довготних максимумів та мінімумів, показаних на лівій панелі рис. 6. Зазначимо, що стійкою спадною залежністю від приземного тиску характеризується вихід на поверхню радону та інших глибинних газів (див., наприклад, [11]): збільшення тиску призводить до «закупорювання» газів у підповерхневих шарах земної кори. Наявність такої самої залежності для йоносферних ефектів вказує на те, що еманация радону є невід'ємною частиною механізму впливу ЗТ на йоносферу. Таким чином, літосферний вплив на атмосферу та йоносферу характеризується: а) залежністю від довготи; б) залежністю від фонових значень ПАТ; в) високою подібністю залежностей а) і б) атмосферного та йоносферного ефектів між собою.

Важко знайти пояснення таким закономірностям в атмосфері й йоносфері. Так, довготні зміни $A(\text{TEC})$ не можна пояснити незбігом географічної та геомагнітної систем координат, оскільки тут слід очікувати змін ПЕВ з одним максимумом поблизу довготи магнітного північного полюса (близько 147° зх. д. у 2012 р.), де геомагнітна широта найбільша, та мінімумом у протилежній півкулі. Для атмосфери також важко вказати якісь особливості на довготах локальних максимумів $A(P_0)$; зокрема, і максимуми, і мінімуми $A(P_0)$ припадають на акваторію. Механізми впливу літосфери на атмосферу та йоносферу також не можуть бути тотожними через їх різне розташування і суттєву відмінність фізичних умов.

Водночас особливості геологічної будови літосфери на вказаних довготах доволі очевидні. Головний літосферний ефект спостерігається над Серединно-Атлантичним хребтом, який характеризується одним з найбільших на Землі потоків глибинних газів [34, 35] за відносно слабкої сейсмічної активності. Довгота 140° сх. д. припадає на зону субдукції, що розділяє дві тектонічні

плити та визначає високу сейсмічну активність поблизу Японських островів, а також є джерелом потужного потоку глибинних газів. Отже, еманация глибинних газів у якості первинного чинника як атмосферних, так і йоносферних варіацій найкраще пояснює встановлені довготні особливості $A(P_0)$ та $A(\text{TEC})$. Вирішальна роль цього явища підтверджується залежністю літосферно-атмосферних та літосферно-іоносферних ефектів від фонових значень приземного тиску (рис. 6), який контролює вихід на поверхню газів, що накопилися у верхніх шарах земної кори [11].

3. Обговорення

Статистичні дослідження, що включають, разом з попередніми, близько 70 сейсмічних подій, свідчать про реальність змін атмосферних та йоносферних параметрів під час зростання ГСА. Приземний тиск P_0 має знижені значення протягом приблизно п'яти днів до зростання ГСА та підвищені — протягом п'яти днів після зростання ГМА. Температура повітря T змінюється у протифазі. Подібні зміни P_0 і T напередодні ЗТ реєструвалися й іншими дослідниками. Зміни електронної концентрації області F2 йоносфери N_e , що оцінюються за змінами ПЕВ чи f_0F2 , характеризуються різким зростанням за два—п'ять днів до зростання ГСА, яке триває кілька днів. Також часто, але не завжди, різке зростання ГСА супроводжується невеликим зростанням геомагнітної активності.

Типові значення відхилень складають: ΔP_0 — до 2 гПа, ΔT — до 0.3 К, ΔN_e — 3...4 %. На окремих довготах, насамперед поблизу серединно-океанічних хребтів, відхилення можуть бути удвічі більшими. Зростання ГМА досягає 6 нТл, але ця цифра, мабуть, є завищеною, оскільки більш низька статистична надійність результату свідчить про неповне виділення впливу «знизу» на фоні потужного впливу космічної погоди «зверху». Ефекти реєструються на довільній відстані від осередків потужних ЗТ, у тому числі у сейсмічно спокійних регіонах. Це принципова відмінність наших результатів від отриманих іншими авторами.

Завдяки встановленим довготним особливостям ефекту, що вказують на певний механізм впливу, ми розглядаємо ефект в атмосфері як на-

слідок літосферного впливу, на відміну від зворотного впливу атмосферної циркуляції на ініціацію ЗТ (див., наприклад, [36, 37]). У роботі [37] розглядається вплив атмосфери на окремих сейсмоактивний регіон при переході від антициклону до циклону завдяки тому, що сила, яка діє на земну поверхню на площі типового циклону, складає $10^{15} \dots 10^{16}$ Н. У роботі [36] показано можливість ініціації потужних ЗТ з $M > 6$ міжпівкульними перетоками повітря з різницею тисків до 8 мбар. Зазначимо, що встановлені часові межі прояву аномалій ΔP_0 від п'яти днів напередодні ЗТ та п'яти днів після є середніми, тоді як в окремих пунктах спостереження час максимуму та мінімуму може розрізнятися на два—три дні, що створює умови для перетоків повітря як у окремому регіоні, так і між півкулями. Раніше було показано [28, 29], що для сильних ЗТ різниця тисків між східною і західною півкулями може досягати 10 мбар.

На перший погляд, амплітуда встановленого ефекту незначна: так, типове значення ΔP_0 — до 2 гПа, або не більш ніж 0.2 % від тиску на рівні моря. Однак слід врахувати його планетарний прояв: вказаним змінам ΔP_0 відповідатимуть зміни енергії $\Delta E = \Delta P_0 S H \approx 7 \cdot 10^{20}$ Дж. Для $\Delta T = 0.3$ К зміни теплової енергії складають $\Delta T_m = C \rho_0 S H \Delta T \approx 1.4 \cdot 10^{21}$ Дж. Тут S — площа поверхні Землі, H — висота центру ваги атмосфери, C — питома теплоємність повітря, ρ_0 — густина повітря. Навіть якщо помітні ефекти охоплюють половину земної кулі, це лише у кілька разів менше від енергії флуктуацій кутової швидкості Землі $\Delta E_\omega \approx 5 \cdot 10^{21}$ Дж (для $\Delta \omega / \omega \sim 10^{-8}$) та більше енергії найпотужніших ЗТ (до 10^{19} Дж [38]).

Довготні залежності $A(P_0)$ і $A(\text{ТЕС})$ свідчать, що первинним джерелом збурення в атмосфері та іоносфері може бути еманация глибинних газів (так звана холодна дегазація). Цей процес є глобальним і, водночас, суттєво нерівномірним у часі та просторі [27, 34, 35, 39, 40], що добре підходить для пояснення встановлених глобальних ефектів. Зазвичай звертають увагу на вихід на поверхню водню, метану та радону. Зазначимо, що саме бульбашкові утворення водню і метану «виносять» на поверхню молекули радону (висока молекулярна вага радону виключає його мимовільну міграцію) та забезпечують швидкі часові зміни потоку радону (див., наприклад, [41]).

Механізми впливу радону та його дочірніх продуктів на атмосферу й іоносферу розглянуто, зокрема, в [19]. Одна α -частинка може породити близько $3 \cdot 10^5$ електрон-іонних пар. Молекули водяної пари через високу поляризацію приєднуються до іонів (реакція гідратації), що призводить до утворення більш важких іонів та іонних кластерів. У цьому процесі, еквівалентному конденсації молекул води на іоні, виділяється прихована теплота випаровування до $Q = 16$ Дж/(м³с), що на порядки перевищує енергію, яка була витрачена на іонізацію ($1.7 \cdot 10^{-9}$ Дж/(м³с) при активності радону 2 000 Бк/м³), тобто реалізується тригерний ефект. У результаті збільшується температура повітря і, як наслідок, зменшується атмосферний тиск, оскільки внутрішня енергія газу $E \sim N_n T \sim P T$.

Для змін в іоносфері важливою є мала рухливість важких іонних кластерів, що призводить до різкого падіння провідності приземного шару атмосфери, зменшення вертикального струму «гарної погоди» і, в результаті, до збільшення різниці потенціалів між Землею та іоносферою у глобальному електричному колі [19]. Через низку процесів це призводить до збурень електронної концентрації в іоносфері.

Відзначимо також роботу [33], де показано, що названі вище первинні процеси, ініційовані радоном, можуть призводити до магнітних збурень з амплітудою до 4 нТл. Цей результат ще більше розширює роль дегазації надр Землі як важливого фактора впливу літосфери на атмосферу, іоносферу та магнітосферу.

Автори [19] стверджують, що просторові розміри іоносферних неоднорідностей визначаються вказаним вище розміром області підготовки землетрусу R_d [10]. Відповідно, вихід на поверхню радону розглядається як результат сейсмічних (деформаційних) процесів у зоні майбутнього ЗТ. Водночас, як було вже зазначено, еманация глибинних газів — суто глобальний процес, причому три четверті газів виділяється у зоні серединно-океанічних хребтів [34]. Більше того, за сучасними уявленнями, саме процеси дегазації є основним джерелом змін об'ємно-напруженого стану літосфери за рахунок змін складу та об'єму гірських порід під час безперервної взаємодії висхідних потоків газів з твердою фазою літосфери [27, 40, 42, 43]. При імплантації цих газів у

зразки гірських порід деформація досягає величин $0.01...0.06$, що суттєво вище граничних руйнівних деформацій літосфери, які дорівнюють 0.0001 [44]. У кінцевому рахунку цей процес призводить до появи різких нестійкостей у вигляді потужних ЗТ.

Таким чином, дегазація земних надр — самостійний літосферний процес, який може мати наслідки як у вигляді ЗТ, так і у вигляді літосферно-атмосферно-іоносферно-магнітосферних ефектів у межах зон деформацій або поза ними. Найявністю власної активності літосфери свідчить про літосферу як про відкрите самоорганізоване середовище, що має загальнопланетарні ритми, індикатором яких (не обов'язково всіх) можуть виступати потужні землетруси. Відповідно, використане у цій роботі поняття «глобальна сейсмічна активність» можна розглядати як один із проявів літосферної активності. Передача частини енергії літосферних процесів у газову оболонку Землі в планетарних масштабах ініціює, у тому числі через тригерні ефекти, каскад нових процесів, що призводять до появи синхронізованих у часі варіацій атмосферних, іоносферних та магнітосферних параметрів. Таким чином, отримані результати можна розглядати як конкретизацію концепції «літосфера—атмосфера—іоносфера—магнітосфера» як відкритої нелінійної системи [38, 45].

Аналіз більш ніж 100 публікацій про реєстрацію радону як провісника ЗТ показав [46], що лише частину аномалій можна дійсно пов'язати із ЗТ. З огляду на це виникає питання, а чи дійсно зареєстровані у багатьох дослідженнях атмосферні й іоносферні ефекти можна пов'язати із конкретними ЗТ. Відповідно, коли джерело збурення достовірно не встановлене, більш коректно щодо названих ефектів вживати терміни «літосферно-атмосферні» і «літосферно-іоносферні» замість «сейсмо-атмосферні» та «сейсмо-іоносферні».

Сказане не виключає можливості впливу ЗТ на різноманітні процеси не лише в осередку ЗТ, але й на великій відстані від нього, у тому числі, можливо, через процеси дегазації. Добре відомо, що сейсмічні хвилі від ЗТ поширюються глобально. Можна припустити, що ці хвилі через вплив на земну кору можуть модулювати потоки глибинних газів і, таким чином, синхронізувати появу атмосферних та іоносферних ефектів

на великій відстані від осередку ЗТ. Якщо сейсмічні хвилі здатні впливати на процес взаємодії висхідних потоків газів з твердою фазою літосфери, то це могло б створити один із механізмів синхронізації сейсмічних процесів у планетарному масштабі.

Висновки

Результати статистичних досліджень, які охоплювали сумарно близько 70 ізольованих сейсмічних подій, свідчать про реальність змін атмосферних та іоносферних параметрів під час зростання ГСА. Приземний тиск P_0 має знижені значення протягом приблизно п'яти днів напередодні різкого зростання ГСА та підвищені — протягом п'яти днів після зростання ГСА. Температура повітря T змінюється у протифазі. Електронна концентрація області F2 іоносфери різко зростає за два-п'ять днів до зростання ГСА. Часто, але не завжди, поблизу періоду різкого зростання ГСА спостерігається також невелике зростання геомагнітної активності.

Типові значення відхилень складають: ΔP_0 — до 2 гПа, ΔT — до 0.3 К, ΔN_e — 3...4 %. На окремих довготах, насамперед поблизу серединно-океанічних хребтів, відхилення можуть бути удвічі більші. Геомагнітна активність посилюється не більше ніж на 6 нТл. Ефекти реєструються на довільній відстані від осередків потужних ЗТ, у тому числі у сейсмічно-спокійних регіонах.

Літосферний вплив на атмосферу та іоносферу характеризується: а) залежністю від довготи з максимальними ефектами над межами літосферних плит; б) спадною залежністю від ПАТ; в) високою подібністю між собою залежностей атмосферного та іоносферного ефектів від довготи і ПАТ. Отримані характеристики впливу можна пояснити наявністю спільного джерела впливу, а саме потоків глибинних газів, у тому числі радіоактивних, які, як відомо, є найбільшими на межах тектонічних плит, при цьому вихід газів у повітря суттєво залежить від атмосферного тиску.

Отримані результати можна розглядати як підтвердження механізмів впливу літосфери на атмосферу, іоносферу та магнітосферу, ініційованих процесами іонізації повітря радоном глибинного походження, та конкретизацію поняття «літосфера—атмосфера—іоносфера—магнітосфера» як єдиної відкритої нелінійної системи.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли — индикатор сейсмической активности. *Доклады АН СССР*. 1988. Т. 301, № 1. С. 67—69.
2. Tronin A.A., Biagi P.F., Molchanov O.A., Khatkevich Y.V., and Gordeev E.I. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area. *Phys. Chem. Earth*. 2004. Vol. 29, Iss. 4—9. P. 501—506. DOI: 10.1016/j.pce.2003.09.024
3. Dunajec M.A., and Pulinet S.A. Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in Mexico. *Atmosfera*. 2005. Vol. 18, Iss. 4. P. 235—247.
4. Пулинец С.А., Узунов Д.П. Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф. *Труды Ин-та прикл. геофизики им. Е.К. Федорова*. 2011. Вып. 89. С. 173—185.
5. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В. Эффекты сильных землетрясений в вариациях электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке. *Геоматематизм и аэрономия*. 2017. Т. 57, № 5. С. 656—663. DOI: 10.7868/S0016794017050170
6. Ouzounov D., and Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv. Space Res.* 2004. Vol. 33, Iss. 3. P. 268—273. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00486-1.
7. Svensmark H., Pedersen J.O.P., Marsh N.D., Enghoff M.B., and Uggerhoj U.I. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions. *Proc. R. Soc. A*. 2007. Vol. 463, Iss. 2078. P. 385—396. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2006.1773>
8. Levina, G.V., Moiseev, S.S., and Rutkevich, P.B. Hydrodynamic alpha-effect in a convective system. L. Debnath and D.N. Riahi, eds. *Nonlinear Instability, Chaos and Turbulence*. Vol. 25. *Advances in Fluid Mechanics*. Lincoln, Lincolnshire, United Kingdom: Wit Press, 2000. P. 111—162.
9. Руленко О.П., Кузьмин Ю.Д. Увеличение объемной активности радона и торона на Камчатке перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений. *Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений*. Материалы VI межд. конф. (Паратунка, Камчатский край, 9—13 сент. 2013). Паратунка, Россия, 2013. С. 430—434.
10. Добровольский И.П. *Теория подготовки тектонического землетрясения*. Москва: Наука, 1991. 224 с.
11. Nishimura S., and Katsura I. Radon in soil gas: applications in exploration and earthquake prediction. *Geochemistry of gaseous elements and compounds*. Athens: Theophrastus Publ., 1990. P. 497—533.
12. Шумакова Е.М. Геодинамика как одна из возможных причин повышения температуры воздуха в зимний период в бассейне Волги. *Ученые записки РГГМУ. Метеорология*. 2019. № 55. С. 59—73. DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-59-73
13. Jin S., Occhipinti G., and Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth-Science Rev.* 2015. Vol. 147. P. 54—64. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.003> 0012-8252
14. Hobara Y., and Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2005. Vol. 67, Iss. 7. P. 677—685. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.02.006
15. Liu J.Y., Chen Y.L., Chuo Y.J., and Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2006. Vol. 111, Iss. A5. A05304. DOI: 10.1029/2005JA011333
16. Липеровская Е.В., Парро М., Богданов В.В., Мейстер К.В., Родкин М.В., Липеровский В.А. О возмущениях f_oF_2 в среднеширотной ионосфере перед сильными землетрясениями. *Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений*. Материалы IV межд. конф. (Паратунка, Камчатский край, 14—17 авг. 2007). Паратунка, Россия, 2007. Секция 5. С. 367—372.
17. Heki K. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, Iss. 17. L17312. DOI: 10.1029/2011GL047908.
18. Хижняк В.В., Деденок В.П., Ткаченко А.А. Ионосферные возмущения перед сильными землетрясениями на Гаити ($M = 7.2$) и в Японии ($M = 9.0$) по данным спутниковых радионавигационных систем. *Космічна наука і технологія*. 2012. Т. 18, № 6. С. 35—42. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2012.06.035>
19. 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. *Геоматематизм и аэрономия*. 2015. Т. 55, № 4. С. 1—19. DOI: 10.7868/S0016794015040136
20. Шувалов В.А., Макаров А.Л., Лазученков Д.Н. Идентификация землетрясений по спутниковым измерениям возмущений ионосферной плазмы. *Космічна наука і технологія*. 2016. Т. 22, № 1. С. 64—78. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2016.01.064>
21. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Yu., and Lizunov G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. Chem. Earth*. 2009. Vol. 34, Iss. 6—7. P. 485—495. DOI: 10.1016/j.pce.2008.07.014
22. Freund F. Charge generation and propagation in igneous rocks. *J. Geodyn.* 2002. Vol. 33, Iss. 4—5. P. 543—570. DOI: 10.1016/S0264-3707(02)00015-7
23. Hoppel W.A., Anderson R.V., and Willet J.C. Atmospheric electricity in the planetary boundary layer. *The Earth's Electrical Environment*. Washington: National Academic Press, 1986. P. 149—165.
24. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F., and Bogdanov V.V. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2005. Vol. 5, Iss. 6. P. 783—789. DOI: 10.5194/nhess-5-783-2005

25. 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. Т. 338, № 4. С. 525–527.
26. Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса. *Тихоокеанская геология*. 1998. Т. 17, № 6. С. 95–103.
27. Гуфельд И.Л. *Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты*. Королёв, М.О.: ЦНИИМаш, 2007. 160 с.
28. Zakharov I.G., and Chernogor L.F. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagn. Aeron.* 2018. Vol. 58, Iss. 3. P. 430–437. DOI:10.1134/S0016793218030167
29. Захаров І.Г., Черногор Л.Ф. Вплив глобальної сейсмічної активності на процеси в атмосфері й іоносфері. *Космічна наука і технологія*. 2021. Т. 27, № 5. С. 19–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.000>
30. Daniel W.W. Friedman two-way analysis of variance by ranks. *Applied Nonparametric Statistics*. 2nd ed. Boston: PWS-Kent, 1990. P. 262–274. ISBN 978-0-534-91976-4
31. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных районах. *Вулканология и сейсмология*. 2004. № 3. С. 63–75.
32. Тертышников А.В. Оценка практической значимости геомагнитных предвестников сильных землетрясений. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 3. С. 63–70.
33. Черногор Л.Ф. Возможность генерации квазипериодических магнитных предвестников землетрясений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019. Т. 59, № 3. С. 400–408. DOI: 10.1134/S0016794019030064
34. Войтов Г.И. Химизм и масштабы современного потока природных газов в различных геоструктурных зонах Земли. *Журнал ВХО*. 1986. Т. 31, № 5. С. 533–539.
35. Сывороткин В.Л. *Озоновый слой, дегазация Земли, рифтогенез и глобальные катастрофы*. Москва: Геоинформмарк, 1994. 68 с.
36. Сытинский А.Д. Об одном солнечно-атмосферном эффекте во время сильных землетрясений. *Докл. АН СССР*. 1979. Т. 245, № 6. С. 1337–1340.
37. Боков В.Н. Изменчивость атмосферной циркуляции — инициатор сильных землетрясений. *Известия РГО РАН*. 2003. Т. 135, вып. 6. С. 54–65.
38. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. Т. 8, № 1. С. 59–106.
39. Войтов Г.И. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли. *Теоретические и региональные проблемы геодинамики. Тр. Геолог. ин-та РАН*. Вып. 515. Москва: Наука, 1999. С. 242–251.
40. Летников Ф.А. Дегазация земли как глобальный процесс самоорганизации. *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды; нефть и газ*. Материалы межд. конф. (Москва, 20–24 мая 2002). Москва: ГЕОС, 2002. С. 6–7.
41. Шулейкин В.Н., Резниченко А. П., Пуцина Л. В. О связях метана, водорода и радона почвенного воздуха. *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы*. Материалы Всерос. конф. (Москва, 22–25 апр. 2008). Москва: ГЕОС, 2008. С. 544–547.
42. Маракушев А.А. *Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности*. Москва: Наука, 1992. 208 с.
43. Gufeld I.L., Matveeva M.I., and Novoselov O.N. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodyn. Tectonophys.* 2011. Vol. 2, Iss. 4. P. 378–415. DOI: 10.5800/GT2011240051
44. Гуфельд И.Л., Гусев Г.А., Матвеева М.И. Метастабильность литосферы как проявление восходящей диффузии легких газов. *Докл. РАН*. 1998. Т. 362, № 5. С. 677–680.
45. Черногор Л.Ф. Земля—атмосфера—геокосмос как открытая динамическая нелинейная система. *Космічна наука і технологія*. 2003. Т. 9, № 5/6. С. 96–105.
46. Woith H. Radon earthquake precursor: A short review. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2015. Vol. 224, Iss. 4. P. 611–627. DOI: doi.org/10.1140/epjst/e2015

Стаття надійшла 06.12.2021

REFERENCES

1. Gorny, V.I., Salman, A.G., Tronin, A.A., and Shilin, B.V., 1988. Outgoing infrared radiation of the Earth as an indicator of seismic activity. *Dokl. AN SSSR*, **301**(1), pp. 67–69 (in Russian).
2. Tronin, A.A., Biagi, P.F, Molchanov, O.A., Khatkevich, Y.V., and Gordeev, E.I., 2004. Temperature variations related to earthquakes from simultaneous observation at the ground stations and by satellites in Kamchatka area. *Phys. Chem. Earth*, **29**(4–9), pp. 501–506. DOI: 10.1016/j.pce.2003.09.024
3. Dunajacka, M.A., and Pulinets, S.A., 2005. Atmospheric and thermal anomalies observed around the time of strong earthquakes in Mexico. *Atmosfera*, **18**(4), pp. 235–247.
4. Pulinets, S.A., and Uzunov, D.P., 2011. There is no alternative to satellite technologies. On the problem of monitoring natural and man-made disasters. *Trudy IPG imeni E.K. Fedorova*, 89, pp. 173–185 (in Russian).
5. Smirnov, S.E, Mikhailova, G.A., Mikhailov, Yu.M., and Kapustina, O.V., 2017. Effects of strong earthquakes in variations of electrical and meteorological quantities in the near-ground atmosphere in Kamchatka. *Geomagn. Aeron.*, **57**(5), pp. 656–663 (in Russian). DOI: 10.7868/S0016794017050170
6. Ouzounov, D., and Freund, F., 2004. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv. Space Res.*, **33**(3), pp. 268–273. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00486-1

7. Svensmark, H., Pedersen, J.O.P., Marsh, N.D., Enghoff, M.B., and Uggerhoj, U.I., 2007. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions. *Proc. R. Soc. A*, **463**(2078), pp. 385–396. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2006.1773>
8. Levina, G.V., Moiseev, S.S., and Rutkevich, P.B., 2000. Hydrodynamic alpha-effect in a convective system. In: L. Debnath and D.N. Riahi, eds. *Nonlinear Instability, Chaos and Turbulence*. Vol. 25. *Advances in Fluid Mechanics*. Lincoln, Lincolnshire, United Kingdom: Wit Press, pp. 111–162.
9. Rulenko, O.P., and Kuzmin, Yu.D., 2013. Increase in the volumetric activity of radon and thoron in Kamchatka before the catastrophic earthquake in Japan on March 11, 2011. In: *Solar-terrestrial interactions and physics of earthquake precursors*. Proc. VI Int. conf. Paratunka, Kamchatka, Russia, Sep. 9–13, 2013, pp. 430–434 (in Russian).
10. Dobrovolskiy, I.P., 1991. *Theory of tectonic earthquake preparation*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
11. Nishimura, S., and Katsura, I., 1990. Radon in soil gas: applications in exploration and earthquake prediction. In: *Geochemistry of gaseous elements and compounds*. Athens: Theophrastus Publ., pp. 497–533.
12. Shumakova, E.M., 2019. Geodynamics as one of possible reasons for an increase in air temperature in winter in the Volga basin. *Trudy RGGMU, Meteorology*, 55, pp. 59–73. (in Russian). DOI: 10.33933/2074-2762-2019-55-59-73
13. Jin, S., Occhipinti, G., and Jin, R., 2015. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth-Science Rev.*, **147**, pp. 54–64. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.05.003 0012-8252
14. Hobara, Y., and Parrot, M., 2005. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **67**(7), pp. 677–685. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.02.006
15. Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chuo, Y.J., and Chen, C.S., 2006. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *J. Geophys. Res.*, **111**(A5), A05304. DOI: 10.1029/2005JA011333
16. Liperovskaya, E.V., Parro, M., Bogdanov, V.V., Meister, K.V., Rodkin, M.V., and Liperovskiy, V.A., 2007. On f_oF_2 disturbances in the mid-latitude ionosphere before strong earthquakes. In: *Solar-terrestrial interactions and physics of earthquake precursors*. Proc. of the IV Int. conf. Paratunka, Kamchatka, Russia, 14–17 Aug. 2007, section 5, pp. 367–372 (in Russian).
17. Heki, K., 2011. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **38**(17), L17312. DOI: 10.1029/2011GL047908
18. Khizhnyak, V.V., Khizhnyak, V.V., Dedenok, V.P., and Tkachenko, A.A., 2012. Ionospheric disturbances before strong earthquakes in Haiti ($M = 7.2$) and in Japan ($M = 9.0$) according to satellite radio navigation systems. *Space Sci. and Technol.*, **18**(6), pp. 35–42 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2012.06.035
19. Pulnits, S.A., Ouzounov, D.P., Karelin, A.V., and 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), pp. 521–538. DOI: 10.1134/S0016793215040131
20. Shuvalov, V.A., Makarov, A.L., and Lazuchenkov, D.N., 2016. Earthquake identification by satellite measurements of ionospheric plasma disturbances. *Space Sci. and Technol.*, **22**(1), pp. 64–78 (in Russian). DOI: 10.15407/knit2016.01.064
21. Korepanov, V., hayakawa, M., Yampolski, Yu., and Lizunov, G., 2009. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. Chem. Earth*, **34**(6–7), pp. 485–495. DOI: 10.1016/j.pce.2008.07.014
22. Freund, F., 2002. Charge generation and propagation in igneous rocks. *J. Geodyn.*, vol. **33**(4–5), pp. 543–570. DOI: 10.1016/S0264-3707(02)00015-7
23. Hoppel, W.A., Anderson, R.V., and Willet, J.C., 1986. Atmospheric Electricity in the Planetary Boundary Layer. In: *The Earth's Electrical Environment*. Washington: Nat. Acad. Press, pp. 149–165.
24. Liperovsky, V.A., Meister, C.-V., Liperovskaya, E.V., Davidov, V.F., and Bogdanov, V.V., 2005. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **5**(6), pp. 783–789. DOI: 10.5194/nhess-5-783-2005
25. Gorkavy, N.N., Trapeznikov, Yu.A., and Fridman, A.M., 1994. On the global component of the seismic process and its relationship with the observed features of the Earth's rotation. *Dokl. RAN, Geophysics*, **338**(4), pp. 525–527 (in Russian).
26. Vikulin, A.V., and Ivanchin, A.G. 1998. Rotational model of seismic process. *Tikhookeanskaya Geologiya*, **17**(6), pp. 95–103 (in Russian).
27. Gufeld, I.L., 2007. *The seismic process. Physical and chemical aspects*. Korolev, M.R., Russia: TSNIIMash. Publ. (in Russian).
28. Zakharov, I.G., and Chernogor, L.F., 2018. Ionosphere as an indicator of processes in the geospace, troposphere, and lithosphere. *Geomagn. Aeron.*, **58**(3), pp. 430–437. DOI: 10.1134/S0016793218030167
29. Zakharov, I.G., and Chernogor, L.F., 2021. Influence of global seismic activity on processes in the atmosphere and ionosphere. *Space Sci. and Technol.*, **27**(5), pp. 19–34. DOI: 10.15407/knit2021.04.000
30. Daniel, W.W., 1990. Friedman two-way analysis of variance by ranks. In: *Applied Nonparametric Statistics*. 2nd ed. Boston: PWS-Kent, pp. 262–274. ISBN 978-0-534-91976-4
31. Zakrzhevskaya, N.A., and Sobolev, G.A., 2004. Influence of magnetic storms with sudden onset on seismicity in different regions. *J. Volcanol. Seismol.*, **3**, pp. 63–75 (in Russian).
32. Tertyshnikov, A.V., 2013. Estimation of the practical significance of geomagnetic precursors of strong earthquakes. *Heliogeophys. Res.*, **3**, pp. 63–70 (in Russian).
33. Chernogor, L.F., 2019. Possibility of generating quasiperiodic magnetic earthquake precursors. *Geomagn. Aeron.*, **59**(3), pp. 400–408 (in Russian). DOI: 10.1134/S0016794019030064
34. Voitov, G.I., 1986. Chemistry and the scale of the modern flow of natural gases in various geostructural zones of the Earth. *Zhurnal VChO*, **31**(5), pp. 533–539 (in Russian).

35. Syvorotkin, V.L., 1994. *Ozone Layer, Earth Degassing, Rifting and Global Catastrophes*. Moscow, Russia: Geoinformmark Publ. (in Russian).
36. Sytinskiy, A.D., 1979. On a solar-atmospheric effect during strong earthquakes. *Dokl. AN SSSR*, **245**(6), pp. 1337–1340 (in Russian).
37. Bokov, V.N., 2003. Variability of atmospheric circulation as an initiator of strong earthquakes. *Bull. RGO RAN*, **135**(6), pp. 54–65 (in Russian).
38. Chernogor, L.F., 2003. Physics of Earth, Atmosphere, and Geospace from the Standpoint of System. *Radio Phys. Radio Astron.*, **8**(1), pp. 59–106 (in Russian).
39. Voitov, G.I., 1999. On cold degassing of methane into the Earth's troposphere. In: Yu.G. Leonov, ed., 1999. *Theoretical and Regional Issues of Geodynamics. Transactions of GIN RAS*, 515, pp. 242–251. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
40. Letnikov, F.A., 2002. Earth degassing as a global process of self-organization. In: *Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil and gas*. Proc. of the Int. Conf. Moscow, Russia, 20–24 May 2002. Moscow: GEOS Publ., pp. 6–7 (in Russian).
41. Shuleikin, V.N., Reznichenko, A.P., and Pushchina, L.V., 2008. On the relations of methane, hydrogen and radon in soil air. In: *Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil, gas and their parageneses*. Proc. of All-Russian Conf. Moscow, Russia, 22–25 Apr. 2008. Moscow: GEOS Publ., pp. 544–547 (in Russian).
42. Marakushev, A.A., 1992. *The origin of the Earth and the nature of its endogenous activity*. Moscow, Russia: Nauka Publ. (in Russian).
43. Gufeld, I.L., Matveeva, M.I., and Novoselov, O.N., 2011. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodyn. Tectonophys.*, **2**(4), pp. 378–415. DOI: 10.5800/GT2011240051
44. Gufeld, I.L., Gusev, G.A., and Matveeva, M.I., 1998. Metastability of the lithosphere as a manifestation of the ascending diffusion of light gases. *Dokl. RAN*, **362**(5), pp. 677–680 (in Russian).
45. Chernogor, L.F., 2003. Earth–atmosphere–geospace as an open dynamic nonlinear system. *Space Sci. and Technol.*, **9**(5/6), pp. 96–105 (in Russian).
46. Woith, H., 2015. Radon earthquake precursor: A short review. *Eur. Phys. J. Spec. Top.*, **224**(4), pp. 611–627. DOI: 10.1140/epjst/e2015

Received 06.12.2021

I.G. Zakharov, L.F. Chernogor

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

INFLUENCE OF GLOBAL SEISMIC ACTIVITY ON IONOSPHERE AND NEAR-EARTH ATMOSPHERE PARAMETERS

Subject and Purpose. The catastrophic magnitude of life and monetary losses associated with earthquakes spurs extensive searches for reliable earthquake precursors. It is common knowledge that lithospheric processes have a direct bearing on the state of atmosphere and ionosphere during earthquakes. However, the usual practice is to enquire things in the immediate vicinity of the hypocenter, notwithstanding the global nature of seismic processes. The present work is different as considers the changes of pressure and temperature in the near-Earth atmosphere and the total electron content (TEC) in the ionosphere for world regions at arbitrary distances from hypocenters of strong earthquakes.

Methods and Methodology. Employed are the data from the maps of the ionospheric TEC and the maps of the pressure and temperature in the atmospheric surface layer in world regions of 40°N latitude. The quantitative estimates are provided by the superposed epoch analysis for winter seasons between 2012 to 2018. Days of strong earthquakes of the Richter magnitudes within 6.3 to 7.9 are taken for the "zeros" whatever the geographical coordinates of the event.

Results. The near-Earth atmosphere pressure P_0 shows a decrease for about 5 days before the earthquake and gets elevated for about 5 days after the event. The air temperature T behaves in the opposite way. The TEC shows a sharp increase 2 to 5 days before the earthquake. The typical deviations ΔP_0 and ΔT are of up to 2 hPa and 0.3 K, respectively. The TEC deviations, ΔTEC , are within 3 to 4%. Where the longitudes fall on the lithosphere plate boundaries, these deviations are nearly doubled. Also, the magnitude of the effect is higher in the regions where the atmospheric pressure is lower. The established patterns indicate that the gas release from underground plays an important role in the lithosphere-atmosphere and lithosphere-ionosphere interaction effects. In this case, the main part is played by radon fluxes that initiate the near-Earth atmosphere ionization and trigger a whole chain of secondary processes.

Conclusions. The results of the work indicate that atmospheric and ionospheric effects caused by lithospheric processes take place at arbitrary distances from strong earthquake hypocenters. Gaseous emissions from underground play an important role as a primary factor of these global effects.

Keywords: earthquake, radon, atmospheric pressure, total electron content, lithosphere-atmospheric-ionospheric interaction.