

# Методика та моделювання

УДК 550.348.0985: 551.146

Л. В. Лось

д. т. н.

Ю. Б. Бродський

к. т. н.

В. П. Ганношин

к. т. н.

Державний агроекологічний університет

## МОДЕЛЬ ГЕОМАГНІТНОГО ЗБУРЕННЯ В СИСТЕМІ ЗЕМЛЯ – ІОНОСФЕРА

*Розглянута проблема модельного зв'язку в системі Земля – іоносфера з метою виявлення іоносферних провідників землетрусів. Запропонована нова модель, в основі якої лежить зв'язок між деформацією тектонічних плит і силовим магнітним полем Землі. Використання цієї моделі дозволить проводити дослідження відгуку іоносфери на сейсмічні процеси, що протікають в надрах Землі.*

### Постановка проблеми

Екологічна безпека зазвичай розглядається в рамках біосферних процесів, в їх взаємодії з людиною та її діяльністю. Співвідношення сейсмічних процесів з проблемами екології на перший погляд не такі явні, однак, при ретельнішому розгляді виявляються вельми значущими.

Всякий сильний землетрус – це достатньо тривалий процес із стадіями підготовки, реалізації і наслідків, який охоплює не тільки окрему ділянку літосфери, але й гідросферу, біосферу і навіть атмосферу з її верхніми шарами – іоносферою. Тому він (землетрус) не може вважатися точковим у просторі та часі і бути ізольованою подією. Його слід розглядати як процес порушення і подальшого відновлення рівноваги всіх Земних оболонок і ходу довготривалих процесів у великих об'ємах природного середовища.

Саме у цьому контексті слід розглядати сейсмічні явища щодо екології. Тут важливо підкреслити наступні особливості: сьогодні виявляються періоди підвищеної сейсмічної активності як глобальні (вікові, тисячолітні), так і ареальні (внутрішньовікові); уразливість людства до природних катастроф неухильно зростає у зв'язку з підвищенням щільності населення, ускладненням інфраструктури, збільшенням числа уразливих об'єктів і тому подібне; виявлення все більшого числа прямих і опосередкованих зв'язків сейсмічного процесу з тонкими процесами навколоземного простору, що впливають на людський організм та суспільні явища.

Таким чином, сейсмічні прояви слід розглядати як тривалий процес геофізичних порушень, а тому повинно бути зрозумілим суттєве підви-

щення екологічної ролі сейсмічних і супутніх ним процесів у порівнянні з існуючими традиційними уявленнями.

Наслідки землетрусів роблять актуальним проведення досліджень фізичних процесів, що супроводжують підготовку землетрусів на різних фазах і розробку на їх основі методів і засобів прогнозу. Наразі в усьому світі ведуться інтенсивні дослідження з питань розвитку і вдосконалення методів прогнозу землетрусів. Це стосується довго-, середньо- і коротко-строгового прогнозування. Все більше дослідників схиляються до іоносферних провісників землетрусів як найбільш чутливих до протікання сейсмічного процесу. Окрім цього, наявність GPS техніки і мережі іонозондів дозволяє оперативно проводити дослідження іоносфери без додаткових капіталовкладень.

Однак прогнозувати майбутній землетрус без з'ясування зв'язку між фізичними процесами, що протікають в земних надрах, і їх впливом на іоносферу неможливо. Аналіз публікацій за останні 25 років показує відсутність загальноприйнятої фізичної моделі збурень в іоносфері перед землетрусом, що і привело до постановки задачі моделювання геофізичних зв'язків у системі Земля – іоносфера.

#### **Аналіз останніх досліджень**

Проведений аналіз існуючих результатів вимірювань на завершальній стадії підготовки землетрусів [1–4] показує, що іоносферні збурення над областю підготовки сильних землетрусів за декілька днів перед ними виявляються як неоднорідності зі специфічною динамікою розвитку.

У роботах [1,2] було виявлено збільшення інтенсивності ОНЧ-шумів і збурень електронної щільності перед землетрусами. При аналізі висотних розподілів електронної концентрації верхньої частини шару  $F_2$ , що дослідили на супутнику «Інтеркосмос-19» [5], було з'ясовано, що висота максимуму шару  $F_2$  зросла приблизно з 280 до 360 км, а максимальне значення концентрації електронів за день до землетрусу зменшилося з  $3 \cdot 10^5$  до  $10^5$  см<sup>-3</sup>. При реєстрації на супутнику ІК–Б1300 варіацій компонент магнітного поля в діапазоні частот 0,1–8 Гц і вертикальною компоненти квазіпостійного електричного поля перед землетрусом 02.01.1982 р. з магнітудою  $M = 4,8$  були виявлені сплески вертикального квазістатичного електричного поля 3,7 мВ/м у двох близьких зонах за 15 хв. до землетрусу за 2000 км. від епіцентра та за 12 хв. безпосередньо над епіцентром землетрусу. Ширина зон складала приблизно 1–1,5° по широті, при цьому амплітуда магнітних пульсацій, що спостерігалися, на частоті близько 1 Гц складала 3 нТл [6]. При реєстрації варіацій щільності плазми і КНЧ/ОНЧ-вимірювань на борту супутника «Космос 1809» в районі Спітака [6] були виявлені інтенсивні магнітні збурення в зоні  $\pm 6^\circ$  по довготі та  $\pm 4^\circ$  по широті щодо епіцентра майбутнього землетрусу. Амплітуда збурень при цьому складала до 10 нТл на частоті 140 Гц і до 3 нТл на частоті 450 Гц. У цій же зоні відмічені дрібномасштабні (4–10 км. уздовж орбіти)

неоднорідності щільності плазми  $\Delta N / N_0 \approx 3 - 8\%$ , які збурювалися в тих же областях, що й аномальні КНЧ-збудження магнітного поля.

При дослідженні іоносферних ефектів було виявлено, що за день до землетрусу максимальна щільність спорадичних шарів зменшується, а за два дні до землетрусу інтегральна щільність з характерним часом 15 хв. найчастіше збільшується, великомасштабна турбулентність (Е-розсіяння) посилюється, а дрібномасштабна зменшується. Ці ефекти спостерігаються для землетрусів з магнітудою  $M > 5$ . Просторові масштаби перерахованих ефектів – до 300–500 км.

Існують гіпотези зв'язку літосфера–атмосфера–іоносфера.

«Електромагнітна атмосферно-іоносферна» гіпотеза передбачає «резонанс» [8] модель електромагнітного зв'язку у системі літосфера–іоносфера, яка показує, що передача електромагнітної енергії з літосфери в іоносферу, нагрів та його наслідки в Е-області відбуваються при збудженні гіпотетичного резонатора в системі літосфера – іоносфера. Враховуючи блокову будову земної кори і вважаючи, що для не дуже крупних землетрусів характерний розмір зони підготовки землетрусів  $L \approx H$ , де  $H$  – ефективна відстань від Землі до Е-області іоносфери, можна грубо оцінити ємність системи літосфера – іоносфера в зоні підготовки землетрусу як  $C \approx \varepsilon_0 H$ , а індуктивність  $L \approx \mu_0 H$ . Звідси період коливань у системі можна оцінити як  $T = 2\pi\sqrt{LC} \approx 2\pi H \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ , а частоту відповідно як  $f \approx 0,5$  кГц при  $H = 100$  км.

До теперішнього часу експериментальні підтвердження резонансної моделі відсутні. Тому, не виключаючи принципової можливості прояву резонансних іоносферних ефектів при підготовці деяких землетрусів, можна вважати, що ці ефекти не є визначальними в літосферно-іоносферному зв'язку.

«Акустико-гравітаційна» гіпотеза – наразі одна з найпопулярніших гіпотез, згідно з якою в області підготовки землетрусів поблизу поверхні Землі генеруються атмосферні акустико-гравітаційні хвилі (АГХ), розповсюджуються через атмосферу і, доходячи до іоносферних висот, приводять до збурення іоносфери завдяки зіткненням іонів з нейтральними молекулами [8, 9]. Генерація АГХ може бути пов'язана з «поршневим» рухом земної кори, що має блокову структуру, з нестабільними тепловими аномаліями, викликаними виходом парникових газів у атмосферу в розломних зонах земної кори, а також з нестабільним надходженням маси літосферних газів в атмосферу. Експериментально процес генерації АГХ ще не досліджений. Вивчення ефективності можливих механізмів генерації АГХ показує, що найбільш ефективна генерація, викликана нестаціонарним притоком газів, коли потік енергії  $\sim 2 \cdot 10^{-1}$  эрг/см<sup>2</sup> с.

Можна вважати, що одночасні спостереження тиску та інших метеорологічних параметрів у сейсмоактивних регіонах на мережі рознесених пунктів на поверхні Землі та іоносферні спостереження дозволили б

експериментально підтвердити дану гіпотезу, проте такі експерименти складні організаційно і ще ніким не проводилися.

*Гіпотеза літосферно-іоносферного зв'язку* заснована на ефекті збільшення радіоактивності і провідності, що приводять до «модифікації квазіпостійного електричного поля» в приземному шарі атмосфери.

Відомо, що радіоактивність нижніх шарів атмосфери обумовлена в основному такими радіоактивними елементами, як радон, радій, торій, актиній і продуктами їх розпаду. Радіоактивні елементи потрапляють в атмосферу разом з ґрунтовим повітрям. Повітряними потоками вони переносяться вгору до висоти в декілька кілометрів. При цьому швидкість іоноутворення складає величину порядку десяти пар іонів в кубічному сантиметрі за секунду. Дані спостережень свідчать про збільшення рівня атмосферної радіоактивності при підготовці землетрусу, що приводить до зростання швидкості іоноутворення – провідності атмосфери. Згідно з моделлю, має місце модифікація висотного розподілу провідності та електричного поля в шарі Земля – іоносфера. Зі збільшенням рівня радіоактивності у поверхні Землі зростає провідність приземного шару атмосфери заввишки декілька кілометрів, модифікується вертикальне електричне поле. Поблизу поверхні Землі електричне поле зменшується через зростання провідності, а на великих висотах – збільшується в порівнянні з незбуреним станом. Електричне поле поблизу нижньої межі іоносфери може зрости у декілька разів. Отже, оскільки перед землетрусом відбувається додаткова іонізація нижньої атмосфери, посилюється і модифікується локальне електричне поле в іоносфері.

Проте пояснити збільшення висоти максимуму шару  $F_2$  приблизно з 280 до 360 км. і зменшення максимального значення концентрації електронів з  $3 \cdot 10^5$  до  $10^5$  см<sup>-3</sup> за день до землетрусу в рамках висунутої гіпотези не можливо.

*«Акустико-електрична» гіпотеза* збудження Es-генераторів і мініструмових систем у нічній E-області іоносфери під дією акустичних імпульсів, що йдуть від Землі, – одна з останніх гіпотез і поки що не підкріплена спостереженнями. Згідно з цією гіпотезою, що пояснює іоносферні ефекти на достатньо близьких відстанях в декілька сотень кілометрів від майбутніх епіцентрів, передбачається наявність акустичних імпульсів, що розповсюджуються від області підготовки землетрусів до іоносферних висот та генерують електричні струми в спорадичних шарах.

*«Гравітаційно-електростатична» гіпотеза* – одна з останніх гіпотез [10], згідно з якою при землетрусах береться до уваги, що в області підготовки достатньо часто відбувається імпульсне виділення радону. За наявності аерозолів виникають локальні електрогравітаційні френкелевські генератори і мініструмові системи з часом життя порядку декількох хвилин і горизонтальними розмірами до декількох десятків метрів. Нестационарне розділення зарядів і створення мініструмових систем в окремих елементах приводять, з одного боку, до сплесків інфрачервоного випромінювання і до передачі відповідних збурень вгору, в іоносферу з іншого боку.

Проте за даними японського супутника ISSB при  $W=140$  [11] було виявлено характерне зменшення критичної частоти  $f_0F_2$  поблизу геомагнітного екватора і помітне зростання на широтах  $\pm(15-30^\circ)$  (так звана "аномалія Епплтона") у денний та вечірній час, що ніяк не укладається в рамки висунутої гіпотези.

### Методика досліджень

В основу фізичних передумов моделі, що пропонуємо, закладені: модель землетрусу в Сан-Франциско (1906 р.); ротаційна модель епіцентру землетрусу (заснована на збудженому рівнянні – синус Гордона); будова магнітного поля Землі та теоретичні основи магнітогідродинаміки.

Згідно з теоретичними основами магнітогідродинаміки силові магнітні лінії геомагнітного поля "вморожені" як в навколосемний простір, так і в надра Землі. Рух тектонічних плит в надрах Землі призведе до деформації магнітної силової лінії. З моменту часу  $t_0 = 0$  (початок руху тектонічних блоків) на малий елемент геомагнітної силової лінії діє сила деформації з боку тектонічних плит, що прийшли в рух. Оскільки є магнітне притягнення, магнітні силові лінії володіють пружністю, то вони прагнуть випрямитися. Внаслідок цього, по силових магнітних лініях, як по струнах починають розповсюджуватися поперечні хвилі. Тому в основу моделі покладено рівняння плоскої хвилі.

### Результати досліджень

Розглянемо *хвилеве рівняння* – рівняння коливання струни [13]:

$$a_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\text{де } a_1^2 = \frac{T}{\rho};$$

$T$  – *натягнення* в усіх точках струни;

$\rho$  – *лінійна щільність* струни.

Рівняння коливання струни (1) можна розв'язати методом розділення змінних (методом Фур'є) [12]:

$$u_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cos \frac{a_1 n \pi}{l} t + D_n \sin \frac{a_1 n \pi}{l} t) \sin \frac{n \pi}{l} x, \quad (2)$$

$$C_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \sin \frac{n \pi}{l} x dx; \quad (3)$$

$$D_n = \frac{2}{a_1 n \pi} \int_0^l \varphi(x) \sin \frac{n \pi}{l} x dx; \quad (4)$$

$l$  – довжина силової магнітної лінії для висоти, що розглядаємо, визначається через еліптичний інтеграл другого роду;

$f(x)$  – функція, що виражає форму силових магнітних ліній від координати  $x$ ;

$\varphi(x)$  – функція, що виражає швидкість деформації тектонічних плит.

Ряд (2), де коефіцієнти  $C_n$  і  $D_n$  визначені за формулами (3) і (4), представляє функцію  $u_n(x,t)$ , яка є розв'язком рівняння (1) і задовольняє граничним і початковим умовам.

Результати розрахунків амплітуди варіацій силової магнітної лінії залежно від часу  $t$  (доба), що пройшло після зародження сейсмічного процесу, і висоти  $h$  (км) представлені на рис.1.

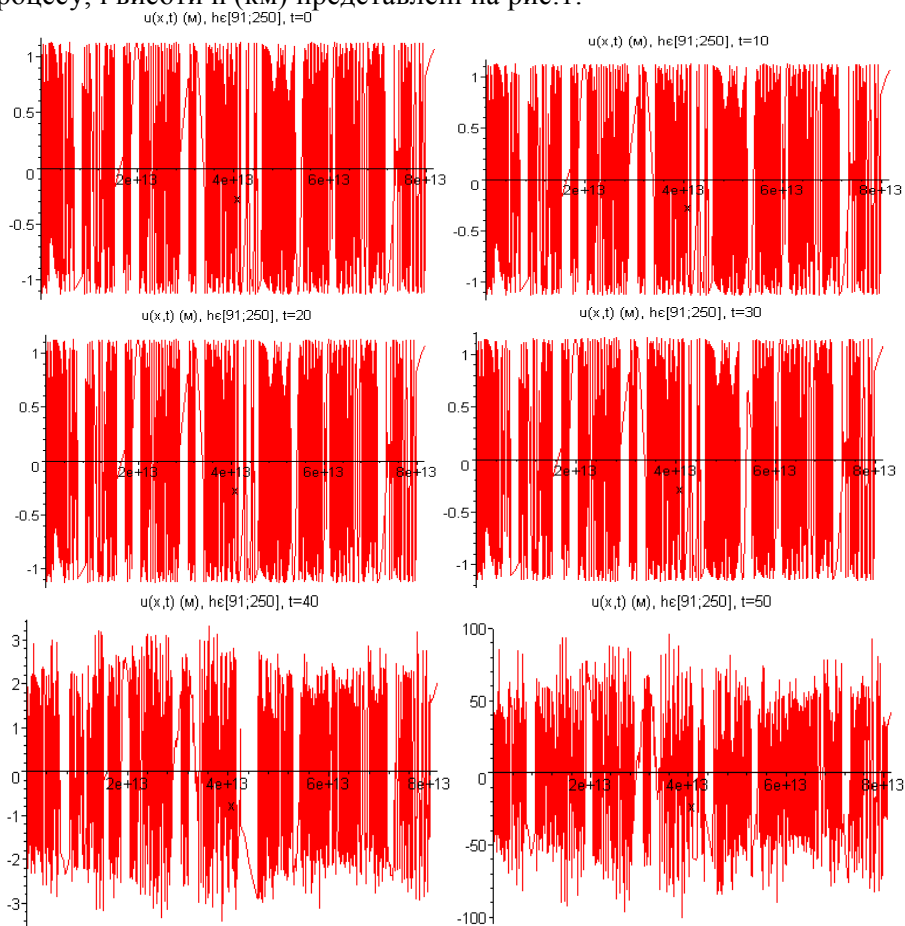


Рис. 1. Розрахунок амплітуди варіацій силової магнітної лінії

### Висновки

1. Амплітуда коливань є функцією часу  $t$  і координати  $x$  ( $m$ ), тобто є стоячою хвилею.

2. Наслідком збільшення в часі швидкості деформації тектонічних плит є збільшення амплітуди коливань магнітних силових ліній в часі.

3. Розподіл інтенсивності амплітуди коливань  $u(x,t)$  по координаті  $x$  нерівномірний (більш інтенсивне розфарбовування  $u(x,t)$ ) (рис.1)).

4. Результати, отримані шляхом математичного моделювання на ПЕОМ, добре співпадають з численними вимірюваннями амплітуди збурення геомагнітного поля [1–4].

#### Перспективи подальших досліджень

Теоретичні основи, закладені у пропоновану модель зв'язку системи Земля – іоносфера, вимагають проведення подальших досліджень щодо впливу магнітних пульсацій на зміну електронної концентрації іоносферних шарів  $E_S$  і  $F_2$ .

#### Література

1. *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin; Heidelberg; New-York.. 2004. 315 p.
2. *Липеровский В.А., Мизулин В.В., Ларкина В.И. и др.* Обнаружение эффектов воздействия землетрясений на ОНЧ-КНЧ-шумы во внешней ионосфере / Препр. № 25 ИЗМИРАН АН СССР. 1982. 28 с.
3. *Ларкина В.И., Наливайко А.В., Гершензон Н.И. и др.* Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23, № 5. С. 842–846.
4. *Serebryakova O.N., Bilichenko S.V., Chmyrev V.M. et al.* Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellite // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. P. 91–94.
5. *Parrot M.* Statistical study of ELF-VLF emissions recorder by a low-altitude satellite during seismic events // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N A12. P. 23339–23347.
6. *Tate J., Daily W.* Evidence of electro-seismic phenomena // Phys. Earth and Planet. Inter. 1989. V. 57. P. 1–10.
7. *Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А.* Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. М.: ОИФЗРАН, 1998. С. 64–87.
8. *Гохберг М.Б., Булошников А.М., Гуфельд И.Л., Липеровский В.А.* Резонансные явления при сейсмоионосферном взаимодействии // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 6. С. 5–8.
9. *Mareev E.A., Iudin D.I., Molchanov O.A.* Mosaic source of internal gravity waves associated with seismic activity // Seismo-Electromagnetics (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling). TERRUPUB, 2002. P. 335–342.
10. *Гохберг М.Б., Шалимов С.Л.* Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу // Российская Академия Наук, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта. М., 2004. 222 с.
11. "Atlas of critical frequency (f<sub>0</sub>F<sub>2</sub>) obtained from Ionosphere Sounding Satellite-b observation". Radio Research Laboratories, Japan, March 1981.
12. *Пискунов Н.С.* Дифференциальное и интегральное исчисления, М. Наука. 1985. т. 2, с. 371.
13. *Соболев С.Л.* Уравнения математической физики: Учеб. пособие: Для вузов/Под ред. А.М. Ильина. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. лит., 1992. – 432 с.