

**ПРО ОДИН З МОЖЛИВИХ СПОСОБІВ КОРОТКОСТРОКОВОГО ВИЯВЛЕННЯ  
КАТАСТРОФІЧНОГО ЗЕМЛЕТРУСУ, ЩО НАСУВАЄТЬСЯ**

*Проведений фізико-математичний аналіз способів виявлення катастрофічного землетрусу. Приведений один з можливих способів виявлення землетрусу, що насувається, за вимірними значеннями амплітуди пульсацій  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі. Результати статистичної обробки даних взаємозв'язку вимірних амплітуд пульсацій  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі, з вірогідністю правильного виявлення землетрусу, свідчать про можливість використання запропонованого способу для практичного його застосування з метою підвищення імовірності правильного виявлення катастрофічного землетрусу та своєчасного попередження про екологічну небезпеку.*

**Постановка проблеми**

Землетруси входять до числа найнебезпечніших природних катаклізмів на нашій планеті. Це зв'язано, перш за все, з тим, що вони відбуваються раптово і протягом десятків секунд викликають величезні руйнування, які призводять до великого числа людських жертв.

Аналіз статистичних даних кількості землетрусів показав, що геодинамічна активність Землі за останні 100 років помітно посилилася. Це підтверджується кількістю постраждалих і загиблих людей (табл. 1, де приведені тільки ті землетруси, при яких загинуло більше 10 000 чоловік [1]) та масштабами економічного збитку (у період з 2000 по 2009 роки загальний економічний збиток від землетрусів наближається до одного трильйона доларів США [1]).

**Таблиця 1.**

№	Дата землетрусу	Місце	Магнітуда	Число загиблих людей
1	17.08.1999	Turkey	7,6	17 118
2	26.01.2001	Gujarat, India	7,6	20 085
3	26.12.2003	South eastern	6,6	31 000

		Iran (Bam)		
4	26.12.2004	Sumatra	9,1	227 898
5	08.10.2005	Pakistan	7,6	86 000
6	12.05.2008	Eastern Sichuan, China	7,9	87 587
7	12.01.2010	Haiti region	7,1	222 570

Як видно з таблиці 1, число загиблих при сильних землетрусах з кожним роком зростає.

На основі проведення довгострокового прогнозування землетрусів [1] відмічається стійка динаміка збільшення числа катастрофічних землетрусів з максимумами в 2011 і 2013 роках та відносним мінімумом у 2012 році.

Відсутність своєчасної та достовірної інформації про сильний (з магнітудою більше 6 балів) землетрус, що насувається, призвела до необхідності розробки способів його виявлення. Актуальним, перш за все, є розробка способів короткострокового та оперативного виявлення катастрофічного землетрусу, оскільки суттєво зменшити кількість людських жертв можна тільки своєчасним попередженням людей та відповідних державних установ.

### **Аналіз останніх досліджень**

У період виникнення і розвитку сейсмічного процесу одночасно діє комплекс різних фізичних механізмів, що приводять до відповідних геофізичних ефектів, які виступають передвісниками землетрусів.

У [2] для виявлення іоносферних передвісників землетрусів пропонують використовувати варіацію повного електронного змісту іоносфери ТЕС (Total Electron Content). Дані про ТЕС отримують в результаті обробки вимірювань групових і фазових затримок сигналів навігаційних супутників системи GPS на частотах 1227,60 МГц та 1575,42 МГц.

У заданому сейсмоактивному регіоні виділяється мережа опорних GPS станцій. Для вибраних станцій вивчається поведінка добової варіації ТЕС: будується часовий ряд, який досліджується за допомогою методів статистичного аналізу; визначається локальна область з найбільшими відхиленнями в ТЕС варіації. Для формування добової варіації ТЕС використовуються вимірювання всіх прольотів над станцією спостереження, тобто добова варіація обчислюється за допомогою усереднювання ТЕС по значній просторовій області іоносфери. Тому, для детальнішого дослідження картини зміни ТЕС, вивчаються варіації ТЕС уздовж прольотів окремих супутників. Для супутників системи GPS період обертання складає 12 сидеричних годин, таким чином, кожен супутник з'являється через добу над однією і тією ж областю з тимчасовим зрушенням близько 4 хвилин, тому можна проводити порівняння варіації ТЕС уздовж певного прольоту на тимчасовому інтервалі в декілька днів.

Рішення про землетрус, що насувається, у спокійних геомагнітних умовах, ухвалюється за зменшенням електронної концентрації над епіцентральною районом, або, що теж саме, за зміною знаку сейсмоіоносферного збурення.

Проте використання одночасного вимірювання групових і фазових затримок сигналів техніки GPS на частоті 1575,42 МГц і 1227,60 МГц для відновлення повного електронного змісту іоносфери має свої недоліки, які не дозволяють оперативно і якісно провести прогноз майбутнього землетрусу [3,4,5].

1. Метод радіопросвічування іоносфери Землі спирається на обернення приведеної різниці фаз радіохвиль і математично відповідає оберненню інтегрального рівняння першого роду. Проблема реалізації методів реконструкції параметрів іоносфери (наприклад, розподіл електронної концентрації) за даними радіопросвічування полягає в тому, що некоректність завдання відновлення не дозволяє отримати точний розв'язок основного інтегрального рівняння, яке було б стійким до малих змін вхідних даних.

2. Практична реалізація методу заснована на використанні вимірювань параметрів радіосигналів на трасі «супутник – наземний пункт» за спостереженнями з одного пункту. При проведенні спостережень під кутом місця від 10 до 90 градусів проекція точки перетину променя зору супутник – приймач з максимумом F2 шару іоносфери може бути віддалена від пункту прийому на відстань до 1100 км.

3. GPS-техніка забезпечує вимірювання групових і фазових затримок сигналів на 1575,42 МГц та 1228,60 МГц з 30-секундним інтервалом одночасно для всіх супутників, що знаходяться в зоні радіовидимості над окремою станцією. Одночасно більше 5–6 супутників можуть спостерігатися у секторах різних азимутів. Як групові, так і фазові затримки є відносними, оскільки містять невідомі апаратні затримки або невідому початкову фазу.

4. Виявлення іоносферних ефектів землетрусів ускладнюється у періоди геомагнітних збурень, коли значно сильніші варіації параметрів іоносфери «маскують» слабкіші сейсмоіоносферні ефекти. Геомагнітна активність обумовлена сонячною активністю і станом міжпланетного середовища.

У [6] відмічається, що під час розвитку землетрусу, що насувається, в епіцентрі останнього мають місце геомагнітні пульсації. Під час підготовки сильних землетрусів ( $M > 4,5$ ) амплітуда геомагнітних пульсацій може досягнути значень більше за 0,1 нТл. Якщо амплітуда геомагнітних пульсацій перевищує 0,1 нТл, приймається рішення про землетрус, що насувається.

Проте прийняття рішення за одним перевищенням обміреної амплітуди геомагнітних пульсацій значення 0,1 нТл не дозволяє впевнено виявити землетрус, що насувається.

1. Переміщення земної поверхні при потужних кар'єрних вибухах призводить до генерації акустико-гравітаційних хвиль, які поширюються у сторони й вгору від джерела землетрусу або вибуху. Ці збурювання, так чи

інакше, досягають іоносферних шарів, де взаємодія між нейтральними молекулами й іоносферною плазмою призводить до флуктуацій геомагнітного поля. Таким чином, наземні промислові, кар'єрні та підземні ядерні вибухи приведуть до схожих як за амплітудою, так і за характером протікання у часі флуктуацій геомагнітного поля [7].

2. В експерименті з 5-кілотонним наземним вибухом виявлені незвичайно довготривалі (до 1 години) регулярні флуктуації геомагнітного поля із 6-хвилинним періодом на відстанях 250 км від вибуху. Такі флуктуації є характерними для внутрішніх гравітаційних хвиль, які вважають основною причиною пульсацій геомагнітного поля перед землетрусами [7].

З проведеного аналізу пульсацій геомагнітного поля [8–12] встановлено, що:

1. Період підготовки землетрусів супроводжується вимірюваними та зареєстрованими часовими варіаціями напруженості атмосферного електричного поля й геомагнітними пульсаціями.

2. За декілька діб перед землетрусами в епіцентрі майбутнього землетрусу неодноразово спостерігалися сплески атмосферного електричного поля  $\delta E \leq 10^3$  В/м та амплітуди варіацій магнітного поля  $\delta B$  від 1 до 10 нТл відносно незбуреного значення.

3. При реєстрації на супутниках низькочастотних випромінювань були виявлені інтенсивні магнітні збурення в зоні  $\pm 6^\circ$  за довготою та  $\pm 4^\circ$  на широті відносно епіцентру землетрусу, що насувається. Амплітуда збурень складала до 10 нТл на частоті 140 Гц і близько 3 нТл на частоті 450 Гц.

4. Варіації складових геомагнітного поля у період підготовки сильного землетрусу реєструються в магнітоспокійні періоди й проявляються у підвищенні локальної геомагнітної активності в районі епіцентру землетрусу, що насувається.

5. Для катастрофічних землетрусів варіації потоку пружної енергії можуть бути викликані так званими сейсмогравітаційними коливаннями, що мають період від 1 до 3 годин. Ці глобальні коливання існують постійно, але стають більше інтенсивними за кілька днів до сильних землетрусів.

6. Геомагнітні збурення можуть викликатися не тільки процесом підготовки землетрусу, але й впливом звичайних природних явищ, магнітними бурями, зміною дня і ночі тощо.

## **Методика досліджень**

Розглянемо, яким чином, використовуючи виміряні значення варіації магнітної індукції поля Землі, можливо виявити катастрофічний землетрус, що

насувається, при цьому, виключити недоліки перерахованих вище способів та збільшити вірогідність правильного рішення.

У зв'язку з тим, що час тривалості геомагнітних пульсацій, які виникають при вибухах і «маскуються» під пульсації геомагнітного поля у період протікання сейсмічного процесу, становить до однієї години – період часу  $T$  виміру значень  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі  $B_g(x)$  повинен складати не менше трьох годин. Крім цього, для виключення впливу геомагнітних збурень, обумовлених сонячною активністю і станом міжпланетного середовища, вимірювання  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі  $B_g(x)$  слід проводити опівночі.

Виміряні значення  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі  $B_g(x)$  накопичуються за період часу  $T$ . Кількість вимірюваних значень ( $n$ ),  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі  $B_g(x)$  визначається за формулою

$$n = \frac{T}{t}, \quad (1)$$

де  $T$  – період часу на вимір  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі  $B_g(x)$ ;

$t$  – дискретність вимірювань, що задається програмно у магнітоваріаційній станції (МВС).

Отримані значення вимірювань  $B_g(x)$  порівнюються з результатами, наперед розрахованими на час вимірювань, значеннями  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі  $B_\mu(x)$ , яка обчислюється за допомогою міжнародної моделі “IGRF10” – інтерактивний калькулятор [13]. Далі необхідно обчислити квадрат відхилень  $\Delta B^2(x)$ , виміряних  $B_g(x)$  та наперед розрахованих  $B_\mu(x)$  значень  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі та середнє значення пульсацій  $X$ , за період часу  $T$ :

$$\Delta B^2(x) = \sum_{i=1}^n [B_g(x)_i - B_\mu(x)]^2; \quad (2)$$

$$\Delta B_{cp}(x) = \frac{\sqrt{\Delta B^2(x)}}{n}, \quad (3)$$

де  $\Delta B^2(x)$  – квадрат відхилень, виміряних  $B_g(x)$  та розрахованих  $B_\mu(x)$  на час вимірювань, за допомогою інтерактивного калькулятора,  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі;

$B_g(x)$  – виміряні за період часу  $T$ , значення  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі;

$B_\mu(x)$  – наперед розраховані на час вимірювань значення  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі;

$\Delta B_{cp}(x)$  – середнє значення пульсацій  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі за період часу  $T$ .

Для ухвалення рішення про виявлення катастрофічного землетрусу, що насувається, є перевищення середнього, за період часу вимірювань  $T$ , значення пульсацій  $\Delta B_{cp}(x)$  величини порогу 1 нТл.

### Результати досліджень

Методика розрахунків значення пульсації магнітної індукції поля Землі, в залежності від різноманітних значень магнітуди землетрусів, розглядалася у [14].

Вірогідність правильного виявлення катастрофічного землетрусу, яка розрахована, використовуючи методику [14] та запропонований спосіб виявлення катастрофічного землетрусу, представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Магнітуда землетрусу	Вірогідність правильного виявлення землетрусу, що насувається
6	0,920
6,5	0,930
7	0,935
7,5	0,940
8	0,942
8,5	0,951
9	0,960

### Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Поява «аномального» збурення магнітної індукції поля Землі перед катастрофічним землетрусом, що насувається, дозволяє використовувати цей ефект для його достовірного виявлення.

2. Для безпомилкового виявлення катастрофічного землетрусу, що насувається, необхідно проводити вимірювання значення  $B_g(x)$  за певний період часу  $T$ .

3. Необхідно обчислювати квадрат відхилень  $\Delta B^2(x)$  виміряних  $B_g(x)$  та наперед розрахованих  $B_\mu(x)$  значень  $X$ -складової вектора магнітної індукції поля Землі та середнє значення цих пульсацій.

4. Аналіз вірогідності правильного виявлення землетрусу, що насувається, (див. табл. 2) свідчить про те, що збільшення магнітуди катастрофічного землетрусу неодмінно призводить до збільшення вірогідності його правильного виявлення (згідно із способом, що пропонується).

Просування в дослідженні варіацій магнітних компонентів поля Землі для виявлення катастрофічного землетрусу, що насувається, поки що недостатньо.

Як відомо з теорії статистичної обробки інформації, збільшення кількості незалежних факторів (в першу чергу – фізичних явищ, які супутні розвитку сейсмічних процесів, супроводжують підготовку і виникнення природних та штучних катаклізмів) призводить до підвищення вірогідності правильного виявлення катастрофічного землетрусу, що насувається.

Таким чином, необхідний подальший пошук незалежних фізичних явищ, що супроводжують розвиток небезпечних природних процесів з метою достовірного виявлення та своєчасного попередження про можливість виникнення екологічної катастрофи.

## Література

---

1. Халилов Э.Н. Глобальные изменения окружающей среды: угроза для развития цивилизации. Первый докл. Председателя Междунар. по проблемам глобальных изменений геологической среды “GEOCHANGE”, 30.06.2010. [Электронный ресурс] / Э.Н. Халилов. – Режим доступа: <http://2012god.ru>.

2. Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. физ.-математ. наук / И.Е. Захаренкова. – Калининград: Российский гос. ун-т им. Иммануила Канта, 2007. – 19 с.

3. Бондур В.Г. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами / В.Г. Бондур, В.М. Смирнов // Докл. Академии наук. – 2005. – Т.402, №5. – С. 675–679.

4. Андрианов В.А. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли / В.А. Андрианов, В.М. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 1993. – №7. – С. 1326–1335.

5. Смирнов В.М. Решение обратной задачи радиопросвечивания ионосферы Земли градиентными методами / В.М. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 2001. – №1. – С. 47–52.

6. *Матрончик А.Ю.* О генерации в гиротропном слое ионосферы геомагнитных пульсаций в период подготовки землетрясений и проведения подземных взрывов / *А.Ю. Матрончик.* – Режим доступа: [http://www.eltech.ru/science/Conf/table\\_of\\_contents.pdf](http://www.eltech.ru/science/Conf/table_of_contents.pdf).

7. *Гохберг М.Б.* Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование / *М.Б. Гохберг, С.Л. Шалимов* // Российский журнал наук о Земле. – 2000. – Т. 2, № 2. – Режим доступа: <http://elpub.ru/journals/rjes/rus/>.

8. *Липеровский В.А.* Физические модели связи в системе литосфера–атмосфера–ионосфера: лекции БШФФ / *В.А.Липеровский* – Режим доступа: <http://bsfp.iszf.irk.ru/bsfp2006/proceed2006/58-65.pdf>.

9. *Бахмутов В.Г.* Морфологические признаки в структуре геомагнитных вариаций в период подготовки сильнейшего землетрясения 25 марта 1998 г. в Антарктиде / *В.Г.Бахмутов, Ф.И.Седова, Т.А.Мозговая* // Украинський антарктичний журн. – 2003. – № 1. – С. 54–60.

10. *Седова Ф.И.* Анализ геомагнитных вариаций в связи с землетрясениями в Крымско-Черноморском регионе / *Ф.И.Седова, Т.А.Мозговая* // Геофиз. журн. – 2001. – Т. 23, № 1. – С. 115–120.

11. *Липеровский В.А.* Ионосферные предвестники землетрясений / *В.А. Липеровский, О.А. Похотелов, С.Л. Шалимов.* – М.: Наука, 1992. – 304 с.

12. Исследование ионосферных предвестников для землетрясений класса М~5.0 / *И.Е. Захаренкова, И.И. Шагмуратов, А.Ф. Лаговский, А. Кранковский.* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/039.pdf>.

13. Міжнародна модель “IGRF10” – інтерактивний калькулятор [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/IGRFWMM.jsp>.

14. *Brodsky Yu. B.* The hypothesis of the relationship between the current seismic process and the geomagnetic field pulsations / *Yu. B. Brodsky, V.P. Gannoshyn* // Украинський антарктичний журнал. – 2009. – № 8. – С. 79–84.

---