

УДК 550.38

## Дослідження іоносферних провісників землетрусів (експеримент «Попередження»)

М. Я. Коцаренко<sup>1</sup>, В. Є. Корепанов<sup>2</sup>, В. М. Івченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

<sup>2</sup> Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро Фізико-механічного інституту НАН України, Львів

*Надійшла до редакції 04.05.95*

---

Обговорюються ефекти збурень іоносфери, пов'язані з сейсмічними явищами, особлива увага звертається на іоносферні провісники землетрусів. Обґрунтовується необхідність вивчення цих провісників та вказується на переваги космічних засобів при вимірюванні параметрів іоносфери, які можуть бути використані для побудови короткострокових прогнозів землетрусів в глобальній системі прогнозування сейсмічних явищ. Приведені основні параметри космічного апарата та наукового комплексу в міжнародному експерименті «Попередження», що готується в рамках державної космічної програми України.

---

Останніми десятиріччями з метою прогнозу землетрусів більшість розвинутих країн проводять інтенсивні дослідження, як традиційні — сейсмологічні, геофізичні, тектоно-магнітні, так і нетрадиційні — іоносферні та інші. Широка мережа сейсмічних станцій і пунктів попередження землетрусів охоплює цілу земну кулю, і на її утримання щорічно витрачаються десятки мільйонів доларів. Проте їх ефективність досить мала через неоптимальне розташування станцій та недостатньо обґрунтовані передбачення. У переважній кількості випадків прогнози були безуспішними. Яскравим прикладом є недавній землетрус в околицях Сан-Франциско (1994 р.), де зосереджена велика кількість традиційних наземних сейсмозасобів, але жодного провісника не було зареєстровано і попередження про землетрус не було зроблено. Прогноз надзвичайно насиченої та добре обладнаної мережі для довготермінових прогнозів розійшовся з реальністю на декілька місяців у часі та приблизно на 600 км щодо місця епіцентру. Тому для уникнення людських та матеріальних втрат особливого значення набувають короткотермінові прогнози землетрусів. На даний момент відомо понад десять різних ефектів (геологічних, геохімічних, геофі-

зичних, біологічних та ін.), які слід враховувати при складанні короткотермінових прогнозів. Проте достовірність та надійність таких прогнозів поки що невелика. Відомі випадки вдалого прогнозу в Китаї, де використовувалися відомості про рівень ґрунтових вод у свердловинах та вміст радону в землі. Повідомлялося також про правильні прогнози в Греції з використанням телуричних спостережень. Однак набагато частішими є випадки хибних прогнозів такого роду. Крім того, усі пропонувані короткотермінові прогнози є більш локальними, ніж сейсмологічні, і тому вимагають ще щільнішої мережі станцій. Тому використання будь-яких нових ефектів, пов'язаних з сейсмічними процесами, для короткотермінового прогнозування дуже бажане.

Загальна стратегія короткотермінового прогнозу землетрусів повинна орієнтуватися як на широку систему наземних сейсмічних станцій, так і космічну систему з багатьох супутників, дані яких повинні оброблятися в режимі реального часу для збільшення достовірності прогнозу того чи іншого землетрусу. Основною науковою передумовою космічного компонента системи моніторингу землетрусів є зв'язок літосфери з іоносферою та магніто-

сферою Землі. Такий зв'язок встановлено на сьогоднішній день як наземними, так і космічними засобами. Вже накопичено великий обсяг фактичного матеріалу, який вказує на наявність відгуків іоносфери на сейсмічну активність. Більше того (і це надзвичайно цікаво та важливо), виявилось, що над місцем майбутнього землетрусу в іоносфері на висотах від сотні до тисячі кілометрів за певний час до землетрусу виникають макроскопічні зміни параметрів іоносфери, які можуть бути зафіксовані космічними апаратами. Це може свідчити про наявність іоносферних провісників землетрусів, вимірювання яких, в принципі, дає змогу ставити питання про космічні засоби їх прогнозування.

Варто зауважити, що вплив сейсмічності на іоносферу вивчається вже більше тридцяти років. Так, Warwick (1963) спостерігав аномалії поглинання космічного радіовипромінювання в іоносфері, які він пов'язав з катастрофічним землетрусом в Чилі, що стався через шість днів після спостережень. Davies та Baker (1965) спостерігали значні зміни параметрів іоносфери, викликані великим землетрусом на Алясці в 1964 р. В колишньому Радянському Союзі було зареєстровано відкриття, суть якого полягала в дії землетрусів на іоносферу, причому енергія передається акустичними хвилями (Таранцев, Бирфельд, 1973).

Що стосується супутникових вимірів, то ще в процесі виконання в 1981—1986 рр. програми експериментів радянсько-французького проекту «Аркад» з використанням розробленого в Україні (КБ «Південне») космічного апарата «Ореол-3» в іоносфері та магнітосфері Землі були виявлені процеси, зумовлені сейсмічною активністю. Важливо, що реєстрація таких процесів мала місце як під час землетрусу, так і за декілька годин (а то і добу) до нового. Подібні явища були зареєстровані також науковою апаратурою супутників «Інтеркосмос-19», «Інтеркосмос-24», «OGO-6», «GEOS-1», «GEOS-2» та інші.

Аналіз одержаних результатів дав змогу виділити п'ять основних типів іоносферних збурень, які передують землетрусам та супроводжують їх.

1. Варіації електричного  $E$  та магнітного  $H$  полів (див. таблицю). Природно, що варіації електричного та магнітного полів перед землетрусами виникають не тільки в іоносфері, а й на поверхні Землі. Для електричного поля такі варіації, мабуть, вперше були зареєстровані в 1924 р. (Чернявський, 1925), варіації ж магнітного поля перед землетрусом в Казані були відмічені ще в 1880 р.

2. Збурення електромагнітних хвиль, перш за все надзвичайно низької частоти — ННЧ ( $f \sim 10^{-2} \div$

#### Основні параметри вимірювань

Вимірювані параметри	Діапазон вимірювань	Частотний діапазон, Гц
Низькочастотні вимірювання: електричного поля, В/(м·Гц) магнітного поля, нТл/Гц	$10^{-7}—10^{-2}$ $10^{-5}—10^{-1}$	10—30 000 10—30 000
Збурення постійної складової: електричного поля, В/м магнітного поля, нТл	$10^{-5}—10^{-1}$ $10^{-4}—10$	0.01—100 0.01—100
Зміни концентрації електронів та іонів, см <sup>-3</sup>	$10^2—10^6$	0.01—10
Зміни температури плазми, К	$10^2—10^5$	0.01—3
Збурення потоку енергетичних часток, см <sup>-3</sup>	$10^4—10^8$	0.01—1
Варіації оптичних емісій [O I] $\lambda\lambda$ 6300, 5577 È, R	1—100	0.001—0.1

$10^2$  Гц) та дуже низької частоти ( $10^2 < f < 10^5$ ). Як правило, максимум ННЧ-коливань припадає на частоту  $f \approx 8$  Гц, а ДНЧ-коливань — на частоти  $f \approx 10 \div 15$  кГц.

3. Збурення густини та температури іоносферної плазми в E- та F-шарах, причому густина плазми може як збільшуватись, так і зменшуватись.

4. Варіації (збільшення) інтенсивності світіння іоносфери, в основному в емісіях атомарного кисню [OI]  $\lambda = 5577$  È та  $\lambda\lambda = 6300—6364$  È. Явище світіння нічного неба перед землетрусом помічено вже давно. Так, воно спостерігалось за добу перед землетрусом над Римом в 373 р. до нашої ери і зафіксовано в історичних хроніках, в недалекому минулому таке ж світіння відзначалось та реєструвалось над Ташкентом в 1966 р. та у Вірменії в 1988 р. Перевага реєстрації оптичних емісій космічними засобами полягає у виключенні впливу погодних факторів та охопленні значних площ за короткий проміжок часу, що дає можливість відокремити локальні варіації від глобальних.

5. Поява або варіації потоків геоактивних частинок в магнітосфері. Виявилось, що варіації  $E$ ,  $H$ , низькочастотні коливання та варіації потоків геоактивних частинок виникають, як правило, за декілька годин до початку землетрусу, а варіації густини, температури та світіння іоносфери можуть виникати за одну-дві доби до землетрусів.

Перелік явищ, супутніх та передуючих землетрусам, не є вичерпним. Так, мають місце аномалії поширення радіохвиль над епіцентром майбутнього

землетрусу, збурення спорадичних Es-шарів іоносфери, геохімічні та біохімічні процеси в морях і океанах; інші явища.

Варто зауважити, що послідовна теорія літосферно-іоносферних зв'язків до цього часу ще не розроблена. Не зовсім зрозумілі механізми взаємозв'язків вказаних оболонок Землі. Хоча з фізичної точки зору ясно, що основними механізмами передачі енергії мають бути акустичний та електромагнітний, але деталізація процесів стикається зі значними труднощами, пов'язаними з недостатньою кількістю експериментальних даних. Довільні коливання земної поверхні призводять до збудження акустичних та гравітаційних хвиль в атмосфері, які, розповсюджуючись вгору, можуть перетворюватися на альвенівські та магніто-звукові хвилі в іоносфері, які проявляються у вигляді ДНЧ- та ННЧ-коливань. З іншого боку, нестаціонарні електричні струми в літосфері, наприклад пов'язані з горизонтальним рухом підземних вод з відносно високою провідністю (в той час як провідність високих шарів води значно менша), у відповідності з рівняннями Максвелла майже миттєво (зі швидкістю світла) проявляються в іоносфері. Значний внесок в теорію електромагнітного зв'язку літосфери та іоносфери внесли вчені ІЗМІРАН та Інституту Фізики Землі РАН (О. А. Молчанов, О. А. Похотелов та інші).

При використанні супутникової системи моніторингу сейсмічної активності виникають деякі труднощі. По-перше, потрібно враховувати зміни сонячної активності, яка також викликає зміни параметрів іоносфери, та дії антропогенних факторів (штучні вибухи, запуски ракет та інше). По-друге, якщо результати активних плазмових експериментів в іоносфері, як правило, оброблялись на протязі місяців, а то й років, то дані супутникових вимірювань іоносфери в системі моніторингу сейсмічної активності потрібно аналізувати за час до появи землетрусу (це десятки хвилин, у кращому випадку години).

Жоден із згаданих супутників не був розроблений спеціально для передбачення землетрусів, тому отримані дані не зовсім підходять для вказаної мети. Крім того, лише незначна їх частина придатна для використання. Тому стає зрозумілим, що тільки цілеспрямована, створена з метою передбачення землетрусів космічна система може забезпечити моніторинг усіх відомих провісників землетрусу, які можна ресструвати з супутників. Кроскореляційний аналіз вимірюваних параметрів різних фізичних явищ, таких як радіохвильові й оптичні випромінювання, космічні промені й потоки часток радіаційних поясів, геомагнітні й гео-

електричні поля, з одного боку, та широкого набору наземних даних, включаючи й сейсмічні, з іншого, дозволять виявити найбільш інформативні й надійні провісники землетрусів.

Національне космічне агентство України розпочало в межах державної космічної програми підготовку космічного проекту «Попередження». Цей проект є першою в світі програмою, спрямованою безпосередньо на пошук провісників землетрусів. До участі в ньому запрошені наукові й дослідницькі організації різних країн з метою об'єднання зусиль на розв'язання цієї важливої проблеми.

Перший етап проекту «Попередження» передбачає запуск у 1998 році космічного комплексу, що складатиметься з головного та одного чи двох субсупутників. За допомогою різноманітного наукового обладнання, встановленого на борту космічного комплексу, буде накопичуватись інформація про електромагнітні параметри іоносфери. Застосування субсупутників збільшить роздільну здатність системи та підвищить надійність результатів вимірювань.

Метою експерименту є пошук іоносферних провісників землетрусів шляхом дослідження електромагнітних пульсацій в іоносфері в діапазоні наднизьких і дуже низьких частот та їх зв'язку з сейсмічними явищами. На другому етапі планується одночасний запуск 6—10 описаних вище космічних комплексів, що дозволить значно розширити дослідження.

Експеримент передбачає вимірювання шести компонент електромагнітного поля (3 електричні та 3 магнітні) в УНЧ-ННЧ-ДНЧ-діапазоні частот. Це дасть змогу визначити не лише амплітуду та спектр збурень, а й їх поляризацію та напрям руху енергії (за вектором Пойнтинга), що, в свою чергу, суттєво підвищить точність визначення координат джерела порівняно з вимірюваннями, які проводилися раніше. Очікувана точність при цьому становитиме 100—200 км за широтою та 1000—2000 км за довготою. При повній реалізації проекту (6—10 КА одночасно) розділення за довготою може бути покращене до 100—200 км.

Планується наступна структура проекту:

- ракетно-космічний комплекс, що включає космічний апарат з технічним забезпеченням та космічну ракетну групу;
- наземний комплекс управління космічним апаратом;
- наземний центр обробки інформації;
- мережа сейсмічних станцій та іншого обладнання (іоносферних та магнітних станцій, оптичних пристроїв та ін.) для наземних вимірювань.

## Параметри космічного комплексу:

Орбіта	кругова, $h = 600$ км
Нахилення	$74^\circ$
Склад:	супутник + 2 субсупутники
Вага: супутника	1500 кг
субсупутника	100 кг
Точність орієнтації супутника	краще $15^\circ$
Кутова стабілізаційна швидкість	менше $0.05^\circ/\text{с}$
Період активної дії	більше 1 року
Тип ракети	«Циклон»

Попередньо планується такий комплект бортової апаратури:

- хвильовий комплекс для вимірювання електричних та магнітних полів;
- апаратура для вимірювання температури та концентрації іоносферної плазми;
- радіоспектрометр для вимірювання профіля електронної концентрації нижче шару F;
- система для вимірювання оптичного випромінювання іоносфери;
- спектрометр заряджених частинок (електронів, протонів, іонів);

- двочастотний передавач (150/400 МГц) для томографічного зондування іоносфери;
- сонячний рентгенівський спектрометр.

Таранцев А. В., Бирфельд Я. Г. Явления воздействия сейсмичности Земли через акустические волны на ионосферу // Краткие описания открытий. ЦНИИПИ.—1973.—Открытие № 128.—С. 157.

Чернявский Е. А. Электрические бури // Бюл. САГУ.—1925.—№ 10.—С. 157.

Chmyrev V. M., Isaev V. N., Bilichenko S. V., and Stanev G. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake zone // Phys. Earth Planetary Interiors.—1989.—110.

Davies K., Baker D. Ionospheric Effects Observed Around the Time of the Alaska Earthquake of March, 1964 // J. Geophys. Res.—1965.—70, N 9.—P. 2251—2253.

Gokhberg M. B., Morgunov V. A., Ye. L. Aronov. Radiofrequency radiation during earthquakes. Doklady Akad. Nauk USSR.—1982.—248, 32.

Korepanov V., Kotsarenko N. Ukrainian Earthquake Prediction Space Project «Warning» — Goals and Methodology of the Experiment. Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Prediction / Ed. by M. Hayakawa and Y. Fujinava. — Tokyo, 1994.—P. 483—487.

Warwick J. W. Radioastronomical Techniques for the Study of Planetary Atmospheres // Radioastronomical and Satellite Studies of the Atmosphere / Ed. by J. Aarons. — Amsterdam: North Holland, 1963.—P. 400.