

ГІПОТЕЗА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ СЕЙСМІЧНОГО ПРОЦЕСУ, ЩО ПРОТІКАЄ, З МОНОЕНЕРГЕТИЧНИМ ПОТОКОМ ЕЛЕКТРОНІВ ШАРУ F2 ІОНОСФЕРИ

Проведено фізичне обґрунтування енергетичного зв'язку сейсмічного процесу, що протікає, з моноенергетичним потоком електронів, які падають вертикально. Представлені результати моделювання впливу енергії коливань силової геомагнітної лінії, під дією рухомих тектонічних плит, на енергію рухомих, уздовж силової лінії геомагнітного поля, електронів. Отримані результати моделювання доводять прямий зв'язок між сейсмічним процесом, що протікає, і змінами електронної концентрації над епіцентральним районом майбутнього землетрусу.

Постановка проблеми

Землетрус – явище природи, що займає одне з перших місць серед інших видів природних катастроф. Раптовість виникнення землетрусів ще більше посилює їх руйнівні наслідки. Руйнування і загибель людей викликаються не тільки власне вібраціями ґрунту, але і різними вторинними природними явищами, які можуть активізуватися в результаті землетрусу (обвали, сніжна лавина, розрідження ґрунту тощо). Велику небезпеку представляють вторинні техногенні дії і наслідки: пожежі, вибухи, викиди радіоактивних і токсичних матеріалів із зруйнованих підприємств, які їх виготовляють. Загрозу здоров'ю людей створюють епідемії, пов'язані з руйнуванням інфраструктури міст: пошкодження систем енерго – та водопостачання, каналізації, утруднення з постачанням продуктів харчування, наданням медичної допомоги тощо. Часто основний збиток при землетрусах пов'язаний саме з вторинними явищами. Стихійні явища, і землетруси зокрема, неминучі. Їх неможливо запобігти, але зменшити їх руйнівний вплив можна і потрібно. Для цього необхідно знати причини виникнення землетрусів, вивчати процеси, пов'язані з їх підготовкою, і розробляти методи прогнозу цього явища.

Проблема прогнозу землетрусів, як і раніше, залишається одною з найважливіших невирішених завдань сучасного моніторингу. В світлі катастрофічних подій останніх років актуальність розвитку і вдосконалення методів прогнозу збільшується. Прогноз землетрусів – складна наукова проблема. Однак, її можна вирішувати, якщо за результатами вимірювань і

теоретично розроблена модель виникнення, розвитку сейсмічного процесу в часі, і встановлений його зв'язок з різними супутніми фізичними процесами.

Виходячи з аналізу існуючих гіпотез зв'язку літосфера–атмосфера–іоносфера [7], можна припустити, що в період виникнення і розвитку сейсмічного процесу одночасно діє комплекс різних фізичних механізмів, що призводять до відповідних геофізичних ефектів. Глибокий фізичний аналіз впливу сейсмічного процесу на навколишнє середовище, з детальним математичним моделюванням останнього, може дати весь спектр можливих і достовірних передвісників землетрусів.

У зв'язку з цим автори спрямували свої дослідження на обґрунтування гіпотези енергетичного зв'язку коливань силової геомагнітної лінії, під дією рухомих тектонічних плит, із змінами електронної концентрації в іоносфері над областю епіцентру майбутнього землетрусу.

Аналіз останніх досліджень

На підставі аналізу даних радіопросвічування іоносфери сигналами навігаційних супутникових систем GPS можна відмітити, що над епіцентром сейсмічної події напередодні землетрусу відбувається порушення просторово – часового розподілу електронної концентрації максимуму $F2$ -шару іоносфери.

У працях [6,9] перераховані основні характеристики іоносферних передвісників сильних землетрусів:

1. Іоносферні передвісники є варіаціями щільності іоносферної плазми (відхилення від незбуреного значення), що спостерігались за 1–5 діб.

2. Тривалість варіації одного знаку невелика і складає 4–6 годин. Тільки у разі дуже сильних землетрусів вона може бути значною ~ 12 годин.

3. В середньому сейсмоіоносферні варіації мають ту ж амплітуду, як і щоденна мінливість іоносфери (15%-25%), але в певні моменти місцевого часу вони можуть перевищувати 100%.

4. Знак і форма сейсмоіоносферних варіацій залежать від місцевого часу (відрізняються для різних регіонів планети) та вимагають додаткового дослідження у кожному конкретному випадку.

5. Розмір модифікованої області іоносфери на висоті максимуму шару $F2$ залежить від магнітуди землетрусу.

6. Положення максимуму модифікованої області в іоносфері не співпадає з вертикальною проекцією епіцентру майбутнього землетрусу.

7. В області епіцентру за 3–5 діб спостерігається зростання електронної концентрації в максимумі шару $F2$ з подальшим її зменшенням за 1–3 діб. При цьому напередодні землетрусу (за 1–2 діб), відбувається порушення просторово-часового ходу максимуму електронної концентрації.

8. Висота максимуму шару $F2$ змістилась приблизно з 280 до 360 км, а максимальне значення концентрації електронів зменшилося з $3 \cdot 10^{11}$ до 10^{11} м^{-3} за день до землетрусу.

Аналіз стану іоносфери в період землетрусів показує виразну тенденцію зменшення електронної концентрації за 1–3 діб до майбутнього землетрусу,

проте численні спроби учених пояснити перераховані фізичні ефекти не увінчалися успіхом.

Методика досліджень

В основі фізичного обґрунтування гіпотези енергетичного зв'язку сейсмічного процесу, що протікає, з моноенергетичним потоком вертикально падаючих електронів лежить модель геомагнітного збурення в системі Земля – іоносфера [7].

В рамках запропонованої моделі проведемо розрахунок середнього значення щільності енергії коливань силової лінії геомагнітного поля для стоячої хвилі:

$$\langle E_e \rangle = \rho(h) \left(\frac{du(x,t)}{dt} \right)^2, \quad (1)$$

де $u(x,t)$ - амплітуда стоячої хвилі, $\rho(h)$ – щільність середовища, що коливається.

Для знаходження повної енергії вертикального перенесення електронів, розглянемо рух електронів в стаціонарному геомагнітному полі під дією сили Лоренця.

На заряджену частинку із зарядом q , яка рухається в геомагнітному полі, діє сила Лоренця:

$$F = q[V \times B], \quad (2)$$

де V – швидкість зарядженої частинки;

$$V = V_{\parallel} + V_{\perp};$$

V_{\parallel} і V_{\perp} – складові швидкості V паралельні і перпендикулярні силовій лінії геомагнітного поля з магнітною індукцією B .

Оскільки магнітна індукція B геомагнітного поля постійна і однорідна ($B = \text{const}$), то рівняння (2) еквівалентне двом рівнянням [5]:

$$m \frac{dV_{\perp}}{dt} = q[V_{\perp} \times B], \quad m \frac{dV_{\parallel}}{dt} = q[V_{\parallel} \times B]. \quad (3)$$

Проекції векторного добутку $[V \times B]$ на осі x, y, z :

$$[V \times B]_x = V_y \cdot B_z - V_z B_y; \quad [V \times B]_y = V_z \cdot B_x - V_x B_z; \quad [V \times B]_z = V_x B_y - V_y B_x$$

Система диференціальних рівнянь, що описує траєкторію польоту електрона по осях x, y, z , як відомо з фізики, має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial t^2} x(t) = \frac{q \left(\left(\frac{\partial}{\partial t} y(t) \right) B_z - \left(\frac{\partial}{\partial t} z(t) \right) B_y \right)}{m}; \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} y(t) = \frac{q \left(\left(\frac{\partial}{\partial t} z(t) \right) B_x - \left(\frac{\partial}{\partial t} x(t) \right) B_z \right)}{m}; \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} z(t) = \frac{q \left(\left(\frac{\partial}{\partial t} x(t) \right) B_y - \left(\frac{\partial}{\partial t} y(t) \right) B_x \right)}{m}. \end{cases} \quad (4)$$

Розглянемо ситуацію: електрон із зарядом $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масою $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, швидкістю $V = 2 \cdot 10^5$ м/с (швидкість теплового руху електронів на іоносферних висотах) влітає під кутом $\alpha = 80^\circ$ до силових геомагнітних ліній B ($B_x = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл, $B_y = 0$, $B_z = 0$). Знайдемо аналітичний розв'язок системи рівнянь (4) для траєкторії електрона у вигляді параметрично заданої (з параметром часу t) системи з трьох рівнянь:

$$\begin{cases} x(t) = 34730,4t; \\ y(t) = 1,12 \cdot 10^{-5} \sin(1,758 \cdot 10^{10} t); \\ z(t) = -1,12 \cdot 10^{-5} + 1,12 \cdot 10^{-5} \cos(1,758 \cdot 10^{10} t). \end{cases} \quad (5)$$

Після диференціювання перших двох рівнянь системи (5) за часом, отримуємо:

$$V_{\parallel} = 3,473 \cdot 10^4, \quad \text{м/с}; \quad (6)$$

$$V_{\perp} = 196962 \cos(1,758 \cdot 10^{10} t), \quad \text{м/с}. \quad (7)$$

Повну енергію E_e рухомого електрона в магнітному полі визначимо із співвідношення

$$E_e = \frac{m(V_{\parallel}^2 + V_{\perp}^2)}{2}. \quad (8)$$

Для оцінки середнього значення щільності енергії $\langle E_e \rangle$ рухомого електрона (8) в геомагнітному полі, проведемо розрахунок останньою при $t \rightarrow 0$:

$$\langle E_e \rangle \approx 18,32 \cdot 10^{-21} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}. \quad (9)$$

Для встановлення зв'язку потоку «скинутих» силовою геомагнітною лінією електронів, в період розвитку коливального процесу останньої, з електронною концентрацією іоносфери, розглянемо моноенергетичний потік електронів з верхньої магнітосфери при нормальному падінні в іоносферу.

Позначимо через E енергію моноенергетичного потоку електронів на висоті h над поверхнею землі, яка визначається співвідношенням [3]:

$$E = E_0 \left(\frac{r_0 - x}{r_0} \right)^{4/7}, \quad (10)$$

де E_0 - початкова енергія моноенергетичного потоку електронів;

$r_0 = \int_{h_0}^{\infty} \rho(h) dh$ - пробіг електрона з початковою енергією E_0 , що визначає висоту максимуму енерговиділення;

висоту максимуму енерговиділення;

$x = \int_h^{\infty} \rho(h) dh$ - товща, або глибина, вищерозміщеної атмосфери.

Якщо $\frac{dE}{dh}$ є швидкістю зменшення енергії моноенергетичного потоку електронів внаслідок проникнення в товщу атмосфери, то в припущенні, що на відрізок в 1 м похідна зберігає постійне значення ($\frac{dE}{dh} = const$), можна тлумачити як швидкість зміни енергії моноенергетичного потоку електронів.

Під час переходу через шар атмосфери завтовшки dh енергія моноенергетичного потоку електронів зменшується на величину dE . Коливальний процес силових геомагнітних ліній охоплює всю верхню атмосферу, аж до верхньої магнітосфери. Виходячи з такого уявлення, можна припустити, що через деякий проміжок часу всі вільні електрони покинуть верхню атмосферу і, дійшовши до висоти максимуму енерговиділення (максимуму об'ємної швидкості джоулевого нагріву), повністю віддадуть свою енергію навколишньому середовищу.

Проте в сейсмостійкім дні електронна концентрація в іоносфері визначається рівнянням безперервності для рівноважної плазми [8]:

$$\frac{\partial Ne(t)}{\partial t} = Na(h)Ne(t)\alpha_1(h) - Ne^2(t)N_+(h)\beta_1(h), \quad (11)$$

де $Na(h)$, $N_+(h)$ – висотне розповсюдження атомів та іонів в іоносфері;

$\alpha_1(h)$, $\beta_1(h)$ – висотні коефіцієнти об'ємної іонізації та дисоціативної рекомбінації.

За відсутності в іоносфері потоку електронів, кількість народжених $Na(h)Ne(t)\alpha_1(h)$ та зникаючих $Ne^2(t)N_+(h)\beta_1(h)$ електронів рівні між собою.

Отже, зміни $Ne(t)$ відсутні $\left(\frac{\partial Ne(t)}{\partial t} = 0\right)$.

Наявність потоку електронів $(\nabla \cdot q_{en})$ в період протікання сейсмічного процесу видозмінює форму рівняння (11), відповідно для дня (12) і ночі (13):

$$\frac{\partial Ne(t)}{\partial t} + \nabla \cdot q_{en} = Na(h)Ne(t)(\alpha_1(h) + \alpha_2(h)) - Ne^2(t)N_+(h)(\beta_1(h) + \beta_2(h)), \quad (12)$$

$$\frac{\partial Ne(t)}{\partial t} + \nabla \cdot q_{en} = Na(h)Ne(t)\alpha_2(h) - Ne^2(t)N_+(h)(\beta_1(h) + \beta_2(h)), \quad (13)$$

де $\alpha_2(h)$, $\beta_2(h)$ - коефіцієнти ударної об'ємної іонізації та рекомбінації, відповідно.

Наявність в рівняннях (12) і (13) доданку $\nabla \cdot q_{en}$ та коефіцієнтів $\alpha_2(h)$, $\beta_2(h)$ призведе до появи додаткової складової $Ne(t)$ в рівнянні (11) і рівновагомість іоносферної плазми порушується.

Нерівновагомість іоносферної плазми в період протікання сейсмічного процесу неодмінно призведе до перерозподілу за висотою величини і складом компоненти, що входять у верхню іоносферу.

Таким чином, в результаті взаємодії моноенергетичного потоку електронів з верхньою атмосферою повинні відбутися як перерозподіл за висотою максимуму електронної концентрації, так і зміна її величини.

Результати досліджень

Результати розрахунку $\langle E_e \rangle$ (1) для максимальної моделі атмосфери [4], магнітуди майбутнього землетрусу $M = 5$ і часу t (доба) після зародження сейсмічного процесу представлені на рис. 1, а для швидкості зміни енергії моноенергетичного потоку електронів (авроральних електронів $(E_0 \approx 4,8 \cdot 10^{19}$ Дж), «скинутих» силовою магнітною лінією електронів в період протікання сейсмічного процесу $(E_0 \approx 6,41 \cdot 10^{-15}$ Дж, $E_0 \approx 1,60 \cdot 10^{-14}$ Дж) на рис. 2.

Висновки

Аналіз представлених залежностей $\langle E_e \rangle$ (рис. 1) та $\frac{dE}{dh}$ (рис. 2) дозволяє зробити такі висновки.

1. Протягом перших тридцяти діб після зародження і протікання сейсмічного процесу сили, що діє з боку тектонічних плит, що прийшли в рух, недостатньо для розвитку коливального процесу силової геомагнітної лінії. У

міру розвитку сейсмічного процесу швидкість руху тектонічних плит збільшується, і як наслідок – збільшується сила дії на силову геомагнітну лінію з боку тектонічної плити, що деформується.

2. Приблизно через тридцять діб (для $M=5$ і максимальній моделі атмосфери) силова геомагнітна лінія починає коливатися. Швидкість зміни амплітуди коливань силової геомагнітної лінії незначна, і як наслідок – середня щільність енергії коливань силової геомагнітної лінії не перевищує середню щільність енергії рухомого на іоносферних висотах електрона. Електрони продовжують свій рух уздовж силових геомагнітних ліній під дією сили Лоренця.

3. За три доби до землетрусу середня щільність енергії коливань силової геомагнітної лінії перевищить середню щільність енергії рухомих на іоносферних висотах електронів, що призведе до «висипання» електронів за висотою – утворення потоку електронів.

4. Наявність потоку “скинутих” силовою геомагнітною лінією електронів призведе до нерівноваги іоносферної плазми, яка, у свою чергу, призведе до порушення просторово-часового розподілу електронної концентрації іоносфери.

Перспективи подальших досліджень

В рамках розглянутої гіпотези енергетичного зв'язку сейсмічного процесу, що протікає, з моноенергетичним потоком електронів, запропонованої моделі геомагнітного збурення в системі Земля – іоносфера [7] і теорії [1], необхідні подальші дослідження, які дозволять визначити висотну функцію розподілу іоносферної електронної концентрації в період протікання сейсмічного процесу.

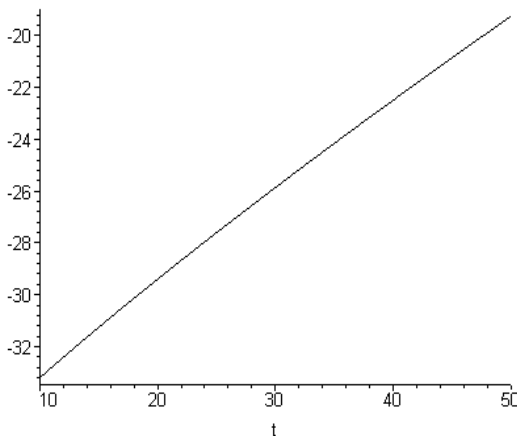


Рис. 1. Щільність енергії стоячої хвилі $\lg(\langle E_e \rangle)$, $h \in [90;350]$ (км), день

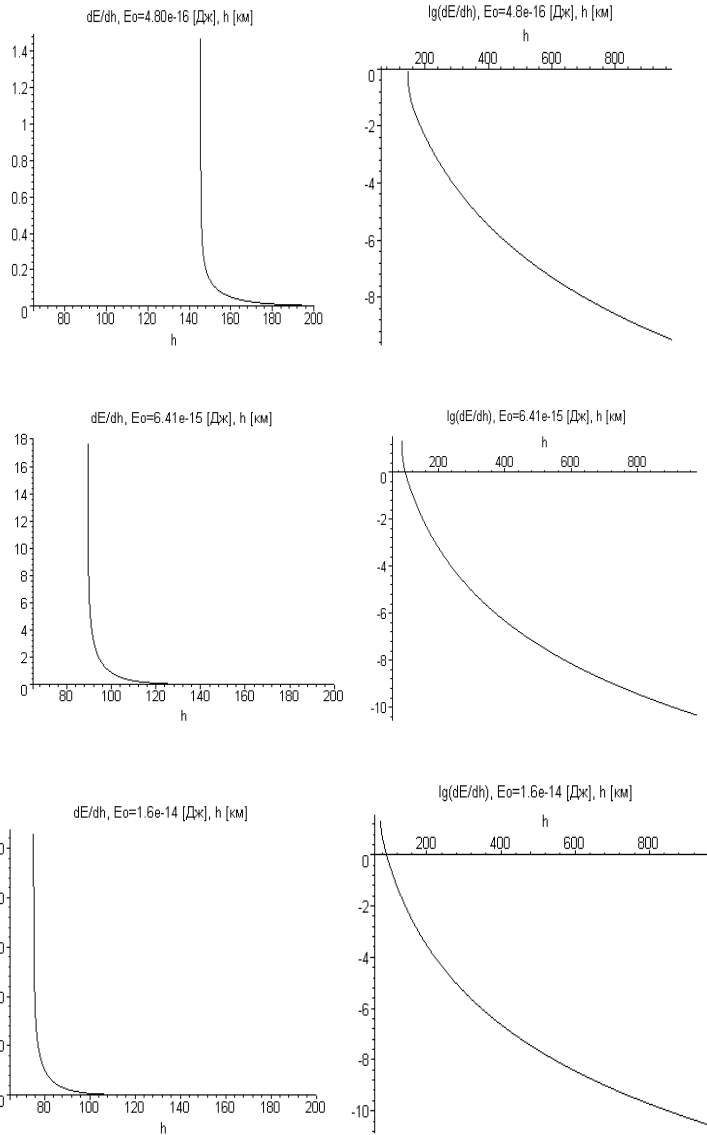


Рис. 2. Швидкість зміни енергії моноенергетичного потоку електронів

Література

1. *Биберман Л.М.* Кинетика ударно-радиационной ионизации и рекомбинации / *Воробьев В.С., Якубов И.Т.*, УФН, т. 107, вып. 3, 1972. – С. 353–387.
 2. *Бродский Ю.Б.* Физическая модель связи в системе литосфера-ионосфера / *Ю.Б. Бродский, В.П. Ганношин* // Наукові дослідження – теорія та експеримент 2008: матеріали 4-ої міжнар. наук.-практ. конф., 19–21 травня 2008 р. – Полтава: «Інтер-графіка», 2008. – С.46–47.
 3. *Брюнелли Б.Е.* Физика ионосферы / *Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе.* – М.: Наука, 1988. – 528 с.
 4. *Исаев С.И.* Полярные сияния и процессы в магнитосфере Земли / *С.И. Исаев, М.И. Пудовкин.* – Л.: Наука, 1972. – 244 с.
 5. *Кузмичев В.Е.* Законы и формулы физики. Справочник. К.: Наукова Думка, 1989. – 864 с.
 6. *Липеровский В.А.* Физические модели связи в системе литосфера–атмосфера–ионосфера: Лекции БШФФ – 2006. – С. 58–65.– <http://bsfp.iszf.irk.ru/-bsfp2006/proceed2006/58–65.pdf>
 7. *Лось Л.В.* Модель геомагнітного збурення в системі Земля – іоносфера / *Л.В. Лось, Ю.Б. Бродський, В.П. Ганношин* // Вісн. ДАЕУ. – 2008. - № 1. – С.426-432.
 8. *Синкевич О.А.* Физика плазмы (стационарные процессы в частично ионизованном газе): учеб. пособие [для вузов] / *О.А. Синкевич, И.П. Стаханов.* – М.: Высш. шк., 1991. – 191 с.: ил.
 9. *Смирнов В.М.* Интерпретация ионосферных возмущений в период слабых землетрясений. Электронный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/012.pdf>
-
-