

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ПРОВІСНИКОВА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЗЕМЛЕТРУСІВ

Показано придатність застосування електромагнітних провідників землетрусів для їх прогнозування в умовах локальності сейсмопрояву. Проаналізовано пре- і косейсмічні електромагнітні ефекти. Оцінено часово-просторові параметри області прояву, умови генерації та характеристики середовища, оптимальні для фіксації надкороткотермінового (косейсмічного) електромагнітного провідника локального землетрусу.

Ключові слова: прогноз локальних землетрусів; сейсмоелектромагнетизм; електромагнітні провідники.

Вступ

Сьогодні розроблено велику кількість моделей провідників землетрусів, які різняться як застосованими методами, так і точністю і надійністю передбачень. За умовами реєстрації характеристик землетрусу сейсмологи виділяють дві системи прогнозування:

1) система, що ґрунтується на вивченні сейсмічних ефектів від “далеких” землетрусів із глибинною локалізацією вогнищ та відстанню до них 100–1000 км;

2) система, що використовує ефекти від “близьких” або локальних землетрусів (зокрема поштовхів техногенного походження) з приповерхневими вогнищами.

У випадку сильних землетрусів і довгострокових прогнозів добре зарекомендували себе різноманітні сейсмогравітаційні провідники; оцінювання неприливних варіацій сили тяжіння, низькочастотних тривимірних варіацій гравітаційного поля, а також різноманітні геохімічні, сейсмогідрогеологічні, сейсμοдеформаційні методи. Активно розвиваються прогностичні вимірювальні засоби, які використовують геофізичні ефекти від віддалених землетрусів – насамперед оцінювання варіації параметрів іоносфери, природного електромагнітного фону, сейсмоелектромагнітних характеристик тощо. Стосовно систем прогнозування локальних землетрусів, то їх провідникові моделі істотно обмежені короткочасною дією сейсмічного поштовху, малими відстанями проходження сейсмічних хвиль та малими магнітудами. Ці фактори значно ускладнюють застосування традиційних методів щодо передбачення землетрусів локального типу.

Проведені дослідження ґрунтуються на вивченні особливостей виникнення індукційного сейсмамагнітного ефекту – збурення геомагнітного поля під дією пружної хвилі від локальних землетрусів. Деякі дослідження [Белов и др., 1974; Сурков, 2000, 2001] показують, що низькочастотні збурення електромагнітного поля Землі надходять за декілька секунд або хвилин до появи у пункті реєстрації сейсмічної хвилі. Тобто у часовому аспекті сейсмоелектромагнітні явища випереджають прихід пружної хвилі від землетрусу і можуть слугувати дуже короткотерміновими електромагнітними провідниками.

На основі сейсмамагнітних спостережень виведено низку емпіричних залежностей між різницею часом приходу електромагнітних і пружних сигналів, енергією, магнітудою землетрусу, відстанню до епіцентра землетрусу r і величиною сейсмамагнітного ефекту (приросту магнітної індукції) [Белов и др., 1974; Гохберг и др., 1989; Гульельми, Левшенко, 1994]. Якщо допустити сталість швидкостей пружних і електромагнітних хвиль у геосередовищі, оцінки їх різницевого часу зівставні між собою, що свідчить про правильність вибраного підходу прогнозування з використанням залежності часу надходження електромагнітного провідника від відстані до сейсмічної події. Щоправда, всі ці закономірності застосовні лише для сейсмічних подій, викликаних “далекими” землетрусами. Натомість вивчення і фіксація варіацій електромагнітного (зокрема геомагнітного) поля Землі, зумовлених дією пружних хвиль від локальних землетрусів, дасть додаткову інформацію про локалізацію сейсмічного джерела і параметри середовища, що можна використати для створення нових несейсмічних методів прогнозу локальних землетрусів [Садовский, 1980; Гохберг и др. 1987, 1985, 1988; Гохберг, 1988]. Відповідно актуальність цього прикладного геофізичного дослідження безсумнівна.

Механізми генерації електромагнітного випромінювання динамічного походження

Під час сейсмічної події від вогнища землетрусу поширюються пружні коливання, які генерують магнітопружні хвилі у провідному середовищі [Кейлис-Борок, Монин, 1959; Викторов, 1975; Дослідження, 2005; Сурков, 1999, 2000; Kaliski, 1960; Yamada, 1989]. У слабких магнітних полях за відсутності взаємозгодження пружного поля із геомагнітним магнітопружні хвилі можна вважати незалежними джерелами електромагнітних збурень. В акустичному режимі переміщення пружної хвилі перед її фронтом формується квазістаціонарний електромагнітний провідник з характерним просторовим масштабом λ , що залежить від електропровідності середовища σ і швидкості пружної хвилі C_l [Сурков, 1997, 1999, 2000]. Амплітуда сигналу електромагнітного провідника зростає у міру наближення

фронту сейсмічної хвилі та знижується обернено до відстані від неї. Відповідно, область, в якій провідник випереджає сейсмічну хвилю, називають *провісниковою*, а якщо час надходження сейсмічного провідника менший – *сейсмічною*. За сталої величини електропровідності верхнього шару осадових порід, просторовий параметр електромагнітного провідника λ лежить в межах 1–100 км, тому, залежно від пружних і провідних властивостей середовища, провідник випереджатиме пружну хвилю на декілька секунд.

Джерелами електромагнітних збурень під час землетрусів є комплекс різноманітних ефектів різної фізичної природи, що генерують статичні та змінні широкодіапазонні (за періодом / частотою) електромагнітні поля. Це так звані “механоелектричні перетворювачі” [Гохберг и др., 1989; Соболев и др., 1980], під якими мають на увазі: вплив дефектів кристалічної ґратки, електрично заряджених тріщин [Гохберг и др., 1980], релаксаційні явища, пов’язані з порушеннями на контактах мінеральних зерен [Куксенко, Килькеєв, 1981], п’єзоелектричні включення [Stacey, 1964; Sornette, Sornette, 1990] тощо.

Найбільші за амплітудою електромагнітні хвилі генеруються тріщинами, що зростають в гірському масиві. Утворення тріщин відриву відбувається синхронно з акустичною емісією [Warwick et al., 1982], але з різною динамікою: акустична емісія зростає до моменту повного руйнування породи, тоді як електромагнітна – активніша на ранній стадії навантаження [Warwick et al., 1982]. У тріщинах, що зростають, виникають сильні електричні поля з напруженістю до 10^8 – 10^9 В/м, що супроводжується інтенсивними електророзрядними процесами, які, своєю чергою, є джерелом електромагнітних хвиль [Гохберг и др., 1980].

Акустичне випромінювання тріщин відриву в області підготовки землетрусу призводить до слабких збурень геомагнітного поля, що може спричинити виникнення ультранизкочастотного електромагнітного шуму [Johnson, 1989; Parrot, 1995] та низькочастотних геомагнітних варіацій, що випереджають землетруси великої енергії. При квазіпаралельному розташуванні ефективних магнітних моментів окремих тріщин відриву і за умови їх полярного положення щодо вектора індукції геомагнітного поля на далеких відстанях знак і поляризація магнітних полів вже не залежатимуть від орієнтації тріщин у просторі. Це значить, що відбувається узгоджене (когерентне) підсилення ультранизкочастотного електромагнітного поля [Сурков, 2000, 2001]. Такий процес відсутній за слабкої сейсмічної активності або під час підготовки землетрусу, коли на утворення тріщин не витрачається великої кількості механічної енергії відриву і, отже, не генеруються сильні цуги електромагнітних хвиль.

Якщо орієнтація зсувних тріщин у просторі рівномірна, то середній ефективний магнітний момент зсувних тріщин дорівнює нулю.

Практичне використання геомагнітних ефектів від одиничних тріщин зсувного типу можливе лише у випадку анізотропності тріщин [Сурков, 1989].

Сейсмамагнітний ефект у провідниковій області

Якісна оцінка сейсмамагнітного ефекту (приросту електромагнітної індукції) у просторі поблизу фронту пружної хвилі описується залежністю:

$$\delta B \approx \nu L \mu_0 \sigma B_0 \ll \frac{\nu}{C} B_0, \quad (1)$$

де δB – приріст магнітної індукції; ν – швидкість руху середовища у сейсмічній хвилі (порядок 2 см/с); L – довжина сейсмічної хвилі; μ_0 – магнітна проникність середовища; σ – електропровідність середовища; B_0 – індукція геомагнітного поля.

На відміну від амплітуди сейсмічних коливань, амплітуда електромагнітних коливань залежить від орієнтації вектора індукції місцевого геомагнітного поля, розмірів акустичного випромінювача, величини добротності передачі енергії пружної деформації в магнітопружну та деяких інших факторів. Тому функцію, що описує залежність збурення геомагнітної індукції від механічного впливу землетрусу, можна визначити так:

$$B_z(0,0,z) = \frac{\mu_0 C J P \cdot R_0}{2z} \left(\cos \psi + \frac{R \sin \psi \sin \gamma}{2z} \right), \quad (2)$$

де R_0 – зона руйнування (вогнищева зона землетрусу, де генерується пружна хвиля); r – відстань від епіцентра землетрусу; C – швидкість поширення пружних хвиль; J – намагніченість; $P \cdot$ – параметр одного порядку із границею міцності середовища на розрив і розтяг, який встановлює пропорційність між напруженнями і відношенням відстані руйнування до відстані від землетрусу; ψ – горизонтальний кут до вогнища землетрусу; γ – вертикальний кут до вогнища землетрусу; z – глибина землетрусу.

Амплітуда електромагнітних збурень внаслідок дисперсійно-дисипативних процесів (в’язкість, неоднорідність включень) у провідному середовищі знижується менше, ніж амплітуда поздовжньої сферичної хвилі, що й зумовлює випередження електромагнітною хвилею пружної. На великих відстанях, переходячи у сейсмічну зону, сферична хвиля набуває універсального вигляду і складається з двох напівхвиль: стиску та розтягу. На просторовій границі переходу з області провідника ($\epsilon > 0$) в сейсмічну зону ($\epsilon < 0$) азимутальна складова B_ϕ змінює знак. Величина ϵ ($\epsilon = -C_1 \tau_1$) задає просторову границю між сейсмічною та провідниковою зонами, з урахуванням пружних властивостей середовища і часу генерації хвиль.

Відповідно нормоване значення азимутальної компоненти магнітної індукції для трьох просто-

рових зон відповідно до параметра ε набуде вигляду [Сурков, 1977, 1997, 2000]:

$$\frac{B_{\Theta}}{A} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \left[v_1 - (v_1 + v_2) \exp\left(-\frac{\tau_1}{t_{\bullet}}\right) + v_2 \exp\left(-\frac{\tau_1 + \tau_2}{t_{\bullet}}\right) \right]; & \varepsilon \geq 0 \\ \exp\left(-\frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \left[v_2 \exp\left(-\frac{\tau_1 + \tau_2}{t_{\bullet}}\right) - (v_1 + v_2) \exp\left(-\frac{\tau_1}{t_{\bullet}}\right) \right] + v_1; & 0 > \varepsilon \geq C_l \tau_1, \\ v_2 \left[\exp\left(-\frac{\varepsilon}{\lambda} - \frac{\tau_1 + \tau_2}{t_{\bullet}}\right) - 1 \right]; & -C_l \tau_1 \geq \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

де B – індукція магнітного поля у сферичній системі координат (r, θ, φ); λ – довжина електромагнітної хвилі; v_1, v_2 – відповідно швидкості руху часток у провідниковій і сейсмічній областях; τ_1, τ_2 – відповідно характерний час акустичного та електромагнітного випромінювання, $A = -B_0 R \sin \theta / (r C_l)$.

У найпоширенішому випадку, коли час генерації акустичного сигналу набагато менший від часу проходження пружної хвилі або коли електропровідність середовища низька, амплітуду індукції електромагнітного провідника можна визначити за рівнянням (4), а напруженість електричного поля – за формулою (5):

$$B_{\bullet} = -B_{\Theta}(0) = \frac{B_0 R \mu_0 \sigma C_l v_2 \tau_2 \sin \Theta}{r}. \quad (4)$$

$$E \sim \mu_0 \sigma v C_l B_0. \quad (5)$$

Часова характеристика провідникової області оцінюється параметром $t_{\bullet}$:

$$t_{\bullet} \approx \frac{D}{C_l^2}; \quad (6)$$

просторовий масштаб λ :

$$\lambda \approx C_l t_{\bullet} \approx \frac{D}{C_l}, \quad (7)$$

де D – коефіцієнт дифузії магнітних збурень (або магнітна в'язкість), $D = (\mu_0 \sigma)^{-1}$.

Для сейсмічної області максимальне значення магнітної індукції B_m описується рівнянням (8):

$$B_m = \frac{B_0 R v_2 \sin \Theta}{r C_l}. \quad (8)$$

Математичне моделювання сейсмамагнітних ефектів локальних землетрусів

Результати математичного моделювання часо-просторових характеристик та амплітуди електромагнітного провідника землетрусів показують, що їх величини залежать від електропровідності середовища, пружних властивостей (швидкості поширення пружної хвилі, швидкості руху середовища фронту хвилі), геометрії акустичного випромінювача. Зі зростанням провідності середовища амплітуда провідника збільшується, а його протяжність зменшується разом з відповідною зміною часу випередження електромагнітної хвилею хвилі сейсмічної (рис. 1).

Ці закономірності справедливі для провідникової зони, тоді як для сейсмічної області провідник і основний (акустичний) сигнал вже набуватимуть протилежної полярності. Тобто знак магнітних збурень на далеких відстанях буде від'ємним.

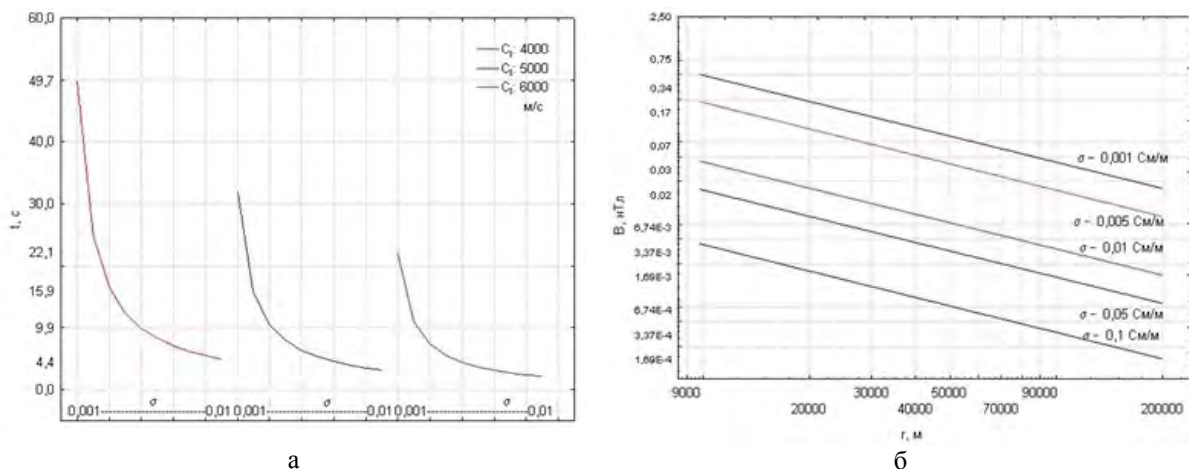


Рис. 1. Часова структура провідникової області за різних значень електропровідності σ (0,001 до 0,1 См/м) і швидкості пружних хвиль C_l (4000–6000 м/с) (а) та залежність магнітного ефекту від відстані до епіцентра землетрусу за різних значень електропровідності σ (0,001 до 0,1 См/м) (б)

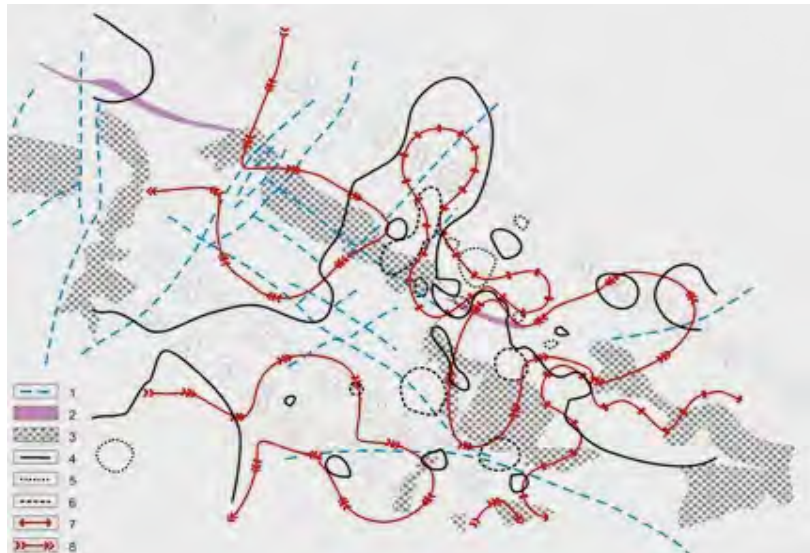


Рис. 2. Просторова-часова конфігурація провідникової області локальних землетрусів Карпатського геодинамічного полігона:

(використано дані про локалізацію землетрусів з [Дослідження..., 2005]):

1 – основні тектонічні розломи; 2 – Пеннінська зона; 3 – вулканічні та метаморфічні породи. Ізолінії: 4 – нульових, 5 – від’ємних, 6 – додатних значень B_m ; часова структура провідникової області: 7 – $t < 2$ с, 8 – $t > 3$ с

Відповідно до формули (6) найбільші різниці часу між приходом електромагнітного провідника і сейсмічної хвилі будуть фіксуватись у ближній від землетрусу зоні, у ній також генеруватимуться найвищі та позитивного знака амплітуди індукції магнітного поля (8). Конфігурація провідникової області (7) залежатиме від пружних і електромагнітних властивостей геосередовища (рис. 2).

Висновки і рекомендації

Сейсмоелектромагнітні явища можуть спричинити різноманітні ефекти магнітних збурень комбінованої природи. Теоретичне обґрунтування на цій основі фізичних механізмів і причин електромагнітних явищ показує, що електромагнітні провідники землетрусу, як і інші провідники, проявляються не завжди і мають досить жорсткі просторово-часові обмеження. Аналіз фізичних умов виникнення і поширення електромагнітного провідника показує, що ефективно реєструвати його можливо у ближній зоні землетрусу, яка передусім залежатиме не від енергетичних, а від просторово-геометричних характеристик. Зважаючи на доволі малі значення амплітуди електромагнітного провідника землетрусів, можна стверджувати, що зростання B_m може бути зумовлене індуктивними магнітними параметрами гірських порід геосередовища провідникової області. У магнітних різновидах порід з великою кількістю феромагнетиків і сильною залишковою намагніченістю амплітуда буде значно вищою, аніж у слабкомагнітному середовищі.

Отже, оптимальним для фіксації електромагнітного провідника локальних землетрусів є анізотропне геологічне середовище з високими

індуктивними та магнітними і низькими пружними та електропровідними параметрами.

Література

- Белов С.В., Мигунов Н.И., Соболев Г.А. Магнитные эффекты, сопровождающие сильные землетрясения на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. – 1974. – Т. 14. № 2. – С. 380–382.
- Викторов И.А. Упругие волны в твердом пространстве с магнитным полем // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 221. № 5. – С. 1069–1072.
- Воробьев А.А., Самохвалов М.А., Ибрагимов Р.Н., Усманова М.Т. Поиск эффектов, обусловленных существованием в литосфере локальных электрических полей // Сейсмология Узбекистана. – Ташкент: Фан. – 1975. – С. 213.
- Гохберг М.Б., Похотелов О.А., Моргунов В.А. Сейсмoeлектрические явления / Под ред. М.А. Садовского. – М.: Недра, 1988. – 174 с.
- Гохберг М.Б. ред. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений. Сб. ст. – И-во ИФЗ АН СССР, 1988. – 242 с.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Добровольский И.П. Источники электромагнитных предвестников землетрясений // Докл. АН СССР. – 1980. – Т. 250. № 2. – С. 323–326.
- Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Липеровский В.А. Электромагнитные предвестники в системе прогноза землетрясений: поиски, проблемы // Вестник АН СССР. – 1987. – № 3. – С. 43–53.
- Гохберг М.Б., Крылов С.М., Левшенко В.Т. Электромагнитное поле очага землетрясений // Докл. АН СССР. – 1989. – Т. 308. № 1. – С. 62–65.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Герасимович Е.А., Матвеев И.В. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. – М.: Наука, 1985. – 116 с.

- Гульельми А.В., Левшенко В.Т. Электромагнитные сигналы от землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1994. – № 5. – С. 65–70.
- Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат / Максимчук В.Ю., Кузнецова В.Г., Вербицкий Т.З. та ін. – К., Наук. думка, 2005. – 256 с.
- Кейлис-Борок В.И., Монин А.С. Магнитоупругие волны и границы земного ядра // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. – 1959. – № 11. – С. 1529–1541.
- Куксенко В.С., Килькеев Р.Ш. Мирошниченко Н.И. К интерпретации электрических предвестников землетрясений // Докл. АН СССР. – 1981. – Т. 260. № 4. – С. 541–843.
- Садовский М.А. ред. Электромагнитные предвестники землетрясений. Сб.ст. – М.: Наука, 1982. – 89 с.
- Соболев Г.А., Демин В.М., Лось В.Ф., Майбук Ю.Я. Механоэлектрическое излучение рудных тел // Докл. АН СССР. – 1980. – Т. 252. – № 6. – С. 1353–1355.
- Сурков В.В. Локальные изменения геомагнитного и геоэлектрического полей при деформации пород у земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1989. – № 5. – С. 91–96.
- Сурков В.В. О природе электромагнитных предвестников землетрясений // Докл. РАН. – 1999. Т. 355. № 6. – С. 818–820.
- Сурков В.В. О роли сдвиговых трещин в формировании электромагнитного шума, предвещающего некоторые землетрясения // Докл. РАН. – 2001. – Т. 377. № 4. – С. 542–546.
- Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – М.: МГИФИ., 2000. – 120 с
- Сурков В.В. Электромагнитный предвестник сейсмической волны // Геомагнетизм и аэрономия. – 1997. – Т. 38. № 6. – С. 155–160.
- Johnson M.J.S. Review of magnetic and electric field effects near active faults and volcanoes in the USA // Phys. Earth and Planet. Inter. – 1989. – Vol. 57. No. 1-2. – P. 47-63.
- Kaliski S. Solution of the equation of motion in a magnetic field for an isotropic body in an infinite space assuming perfect electric conductivity // Proc. Of Vibr. Probl. – 1960. – Vol. 1. No. 3. – P. 53–67.
- Knopoff E.L. The interaction between elastic waves motion and magnetic field in electrical conductors // J. Geophys. Res. – 1955. – Vol. 60. No. 4. – P. 617–629.
- Parrot M. Electromagnetic noise due to earthquake // In handbook of atmospheric electrodynamics. Ed. By H.Volland. CRC Press. Boca Raton, London, Tokyo –1995. – Ch. 4. – P. 94–116.
- Sornette A., Sornette S. Earthquake rupture as a critical point: Consequences for telluric precursors // Tectonophysics. – 1990. –Vol. 179. No 3–4. – P. 327–334.
- Stacey F.D. The seismomagnetic effect // Pure Appl. Geophys. – 1964. – Vol. 58. No. 11. – P. 5–23.
- Warwick J.W., Stoker C., Meyer T.R. Radio emission associated with rock fracture: possible application to the Great Chilean earthquake of May 22, 1960 // J.Geophys. Res. – 1982. – Vol. 87B. No 4. – P. 2851–2859.
- Yamada I., Masuda K., Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture // Phys. Earth and Planet. Inter. – 1989. – Vol. 57. No. 1–2. – P. 157–168.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРЕДВЕСТНИКОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.В. Шабатура

Показана пригодность применения электромагнитных предвестников землетрясений для их прогнозирования в условиях локальности сейсмопроявлений. Проанализированы пре- и косейсмические электромагнитные эффекты. Оценены временно-пространственные параметры области проявления, условия генерации и характеристики среды, оптимальные с точки зрения фиксации сверхкраткосрочного (косейсмического) электромагнитного предвестника локального землетрясения.

Ключевые слова: прогноз локальных землетрясений; сейсмоэлектромагнетизм; электромагнитные предвестники.

AN ELECTROMAGNETIC PRECURSOR'S MODEL OF LOCAL EARTHQUAKES PREDICTION

O.V. Shabatura

The suitability of application of electromagnetic precursors of earthquakes to predict them in a case of locality of seismic effects is shown. Pre- and coseismic electromagnetic effects were analyzed. The time-spatial parameters of display area were evaluated and the conditions of generation and characteristics of the environment which are optimal in terms of fixing of ultra short-term (coseismic) electromagnetic precursor of local earthquake were estimated.

Key words: local earthquakes prediction; seismoelectromagnetism; electromagnetic precursors.