

УДК 550.385.1

В. Ю. СЕМЕНОВ¹, В. Т. ЛАДАНІВСЬКИЙ², М. С. ПЕТРИЩЕВ³

¹ Інститут геофізики, ПАН, вул. К. Януша, 64, Варшава, Польща, 01452, sem@igf.edu.pl

² Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Львів, вул. Наукова, 3-б, 79060; Національний університет "Львівська політехніка" (кафедра ПЗ ІКНІ), Львів, вул. С. Бандери 12, 79013, тел. +380 (32)2648563, borys@cb-igph.lviv.ua

³ Санкт-Петербурзький філіал Інституту магнетизму Землі, іоносфери і поширення радіохвиль, Санкт-Петербург, Росія, 199034, ms_petr@mail.ru

ВИЯВЛЕННЯ ПРОЯВІВ ЗЕМЛЕТРУСІВ У ВАРІАЦІЯХ ПРИРОДНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

<https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.065>

Мета. Загальновідомо, що сильні землетруси типово супроводжуються певними явищами, що є варіаціями природного електромагнітного поля. На підставі ідеї про механізм літосферно-атмосферно-іоносферної взаємодії ми надіємось виявити деякі передвісники сильних природних землетрусів у наборах електромагнітних даних, котрі реєструвались магнітотелуричними станціями досить далеко від епіцентрів. **Методика.** Аналізувались часові зміни спектральної густини енергії в компонентах природного електромагнітного поля по відношенню до землетрусів магнітудою більше ніж 5 (M5+), котрі траплялись і у Європі, і по всьому світу. **Результати.** Варіації електричного і магнітного полів реєструвались у трьох точках встановлених на двох лініях: перша була розташована вздовж зони Тесера-Торнквіста в Польщі, а друга – перпендикулярно до неї. Спостереження проводились із вересня 2015 р. до квітня 2018 р. Дані реєструвались за допомогою стандартних п'яти каналних магнітотелуричних станцій, а саме компоненти магнітного поля вимірювались у трьох ортогональних напрямках а електричного – лише в двох ортогональних горизонтальних. Аналізувались спектри компонент електромагнітного поля відносно землетрусів із магнітудою M5+, які траплялись як у Європі, так і по всій планеті. Зміни в інтенсивності спектрів, котрі можуть бути трактовані як передвісники землетрусів виділені від 24 до 32 годин перед сейсмічною подією. Причини таких ефектів у статті теж обговорюються. **Наукова новизна.** Електромагнітний моніторинг типово проводиться поряд з сейсмічно активними регіонами, але згідно теоретичних викладок деякі явища мають глобальне походження. Ми використали звичайні магнітотелуричні дані, записані в точках, розташованих у середніх широтах досить далеко від сейсмічно активних регіонів, але ми продемонстрували, що такі глобальні зв'язки між сейсмічними і електромагнітними подіями з високою ймовірністю існують. **Практичне значення.** Подібні результати можуть доповнювати інформацію про передвісники землетрусів.

Ключові слова: природне електромагнітне поле; спектри; землетрус; передвісники

Вступ

Добре відомо, що перед сильними землетрусами часто спостерігаються певні явища у варіаціях природного електромагнітного (ЕМ) поля. І передвісники, і постсейсмічні події спостерігаються в широкому діапазоні частот (періодів) ЕМ варіацій, а отже, і було багато спроб їх пояснити. Електрокінетичні ефекти під землею розглядаються як одне з можливих пояснень таких аномальних сигналів [Takahashi et al., 2007; Bordes et al., 2008]. Виявлено також взаємозв'язок між тектонічною активністю та аномальними змінами геофізичних параметрів, що характеризують літосферу Землі [Moldovan et al., 2009]. Мікротріщини, розташовані в зоні підготовки землетрусів, також розглядаються як можливе джерело електромагнітного випромінювання в смузі дуже низьких частот (VLF) і ультранизьких частот (ULF) [Teisseyre and Ernst, 2002].

Ймовірно, такі ефекти були причиною часових змін позірної опору, пов'язаних із сейсмо вулканічною кризою 2010–2011 рр. навколо вулкану Таал. [Ladanivsky et al., 2018].

Кореляція між землетрусами та ЕМ подіями часто пояснюється варіаціями електричного поля, які генеруються у верхніх шарах атмосфери завдяки явищам сейсмо-іоносферного зв'язку [Hayakawa & Hobağa, 2010].

На основі дослідження кореляції Straser et al., [2016] зробили висновок, що практично всім природним землетрусам із M6+ і навіть M5+ передують зростання сонячної активності, що спричиняє відповідне збурення в геомагнітному полі Землі. Вони пояснюють цю кореляцію потоком протонів, що випускається Сонцем. Огляд землетрусів, котрі супроводжувались чіткими слідами в різних діапазонах спектрів ЕМ поля, також можна знайти в [Straser et al. 2016]. І

на протипагу сказаному, вони показали, як на основі своїх власних даних, так і на даних інших дослідників у всьому світі, що техногенним землетрусам, наприклад, руйнівний землетрус, що стався біля греблі Койна в Індії, 1967; землетруси, що супроводжують видобуток нафти, газу та мінералів, кілька ядерних випробувань, не передувало зростання геомагнітної активності. Отже, такі явища можуть слугувати непрямими доказами існування зв'язку між іоносферою та тектоносферою.

Варіації двох горизонтальних електричних та трьох магнітних компонент ЕМ поля реєструвались у трьох точках, розташованих на двох лініях: одна вздовж зони Тессер-Торнквіста в Польщі, інша – перпендикулярно до першої. Спостереження велись із вересня 2015 року по квітень 2018 року. Кілька сильних землетрусів (M5+) сталися за цей час і у Європі (Італія та Румунія), і по всьому світу.

У цій роботі представлено деякі ефекти в зареєстрованих ЕМ полях, котрі корелюють зі значними сейсмічними подіями (італійськими сильними землетрусами, що сталися в 2016 році).

Мета

Загальновідомо, що сильні землетруси типово супроводжуються певними явищами, що належать до варіацій природного електромагнітного поля. Грунтуючись на ідеї про механізм літосферно-атмосферно-іоносферної взаємодії, ми надіємось виявити деякі передвісники сильних природних землетрусів у наборах електромагнітних даних, котрі реєструвались магнітотелуричними станціями досить далеко від епіцентрів.

Методика

Аналізувались часові зміни спектральної густини енергії в компонентах природного електромагнітного поля щодо землетрусів M5+, котрі траплялись і у Європі, і по всьому світу.

Результати

Експериментальні дані

Три магнітотелуричні станції (PSM) були встановлені в трьох різних точках у Польщі і працювали одночасно з вересня 2015 року по квітень 2018 року з кількома несподіваними прогалинами. Дві з трьох станцій (Grabnik – GRB і Kozieniec – KZN) були встановлені в смузі відомої зони Тесера-Торнквіста (TTZ), а остання (Suwalki, SUW) була зміщена в сторону докембрійської східноєвропейської платформи (ЕЕС). Розташування станцій утворює прямокутний кут на карті (див. рис. 1). Таку конфігурацію було обрано для застосування методу узагальненого магнітоваріаційного зондування [Semenov et al., 2011] до даних, але це не є предметом дослідження цієї статті. TTZ – це смуга добре провідних осадових порід завширшки десятки кілометрів і до 7 км завглибшки. Її схили складаються з високоомних кристалічних порід. Якщо глянути на розріз електропровідності поперек TTZ, то можна побачити складність її структури.

На жаль, наш набір даних не є неперервним. Запис розривався кілька разів через відмову обладнання. Серед трьох вимірювальних точок, KZN була більш зашумлена порівняно з GRB на TTZ та SUW на ЕЕС.

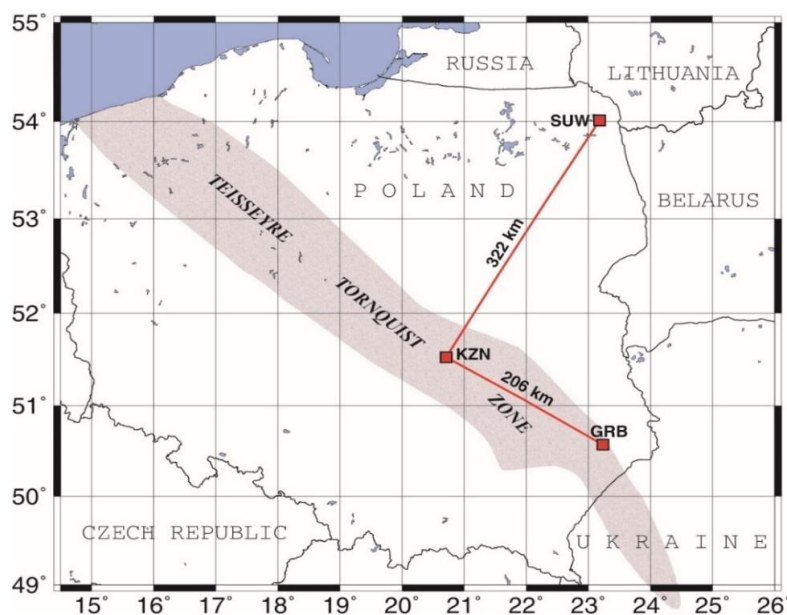


Рис. 1. Розташування точок спостережень у Польщі: Suwalki (SUW), Kozieniec (KZN), Grabnik (GRB)

Протягом зазначеного періоду часу на європейському континенті сталося кілька значних

землетрусів. Серед них можна згадати катастрофічні італійські землетруси 2016 року.

Інформація про землетруси була взята з каталогу геологічної служби Сполучених Штатів (USGS)[<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map>]. Дані аналізувались для виявлення сильних сейсмічних подій, що викликали сигнали в ЕМ полі в точках збору наших даних.

Аналізовані події

Оскільки джерелами довгоперіодних магнітотелуричних варіацій є струми в іоносфері і магнітосфері та базуючись на явищах сейсмо-іоносферного зв'язку

ми намагалися виявити вплив сильних землетрусів (M5+ і M6+) на наші дані. Під час збору даних такі події на території Польщі не були зареєстровані, але такі землетруси мали місце на території Італії та Румунії. На рис. 2 представлені динамічні спектри 5 компонент ЕМ поля в діапазоні періодів 500–10 000 с за жовтень 2016 року в точці GRB. Того місяця в Італії трапилися два землетруси M6.1 (2016-10-26) і M6.6 (2016-10-30), а їхні гіпоцентри були зафіксовані на відстані ~15 км один від одного.

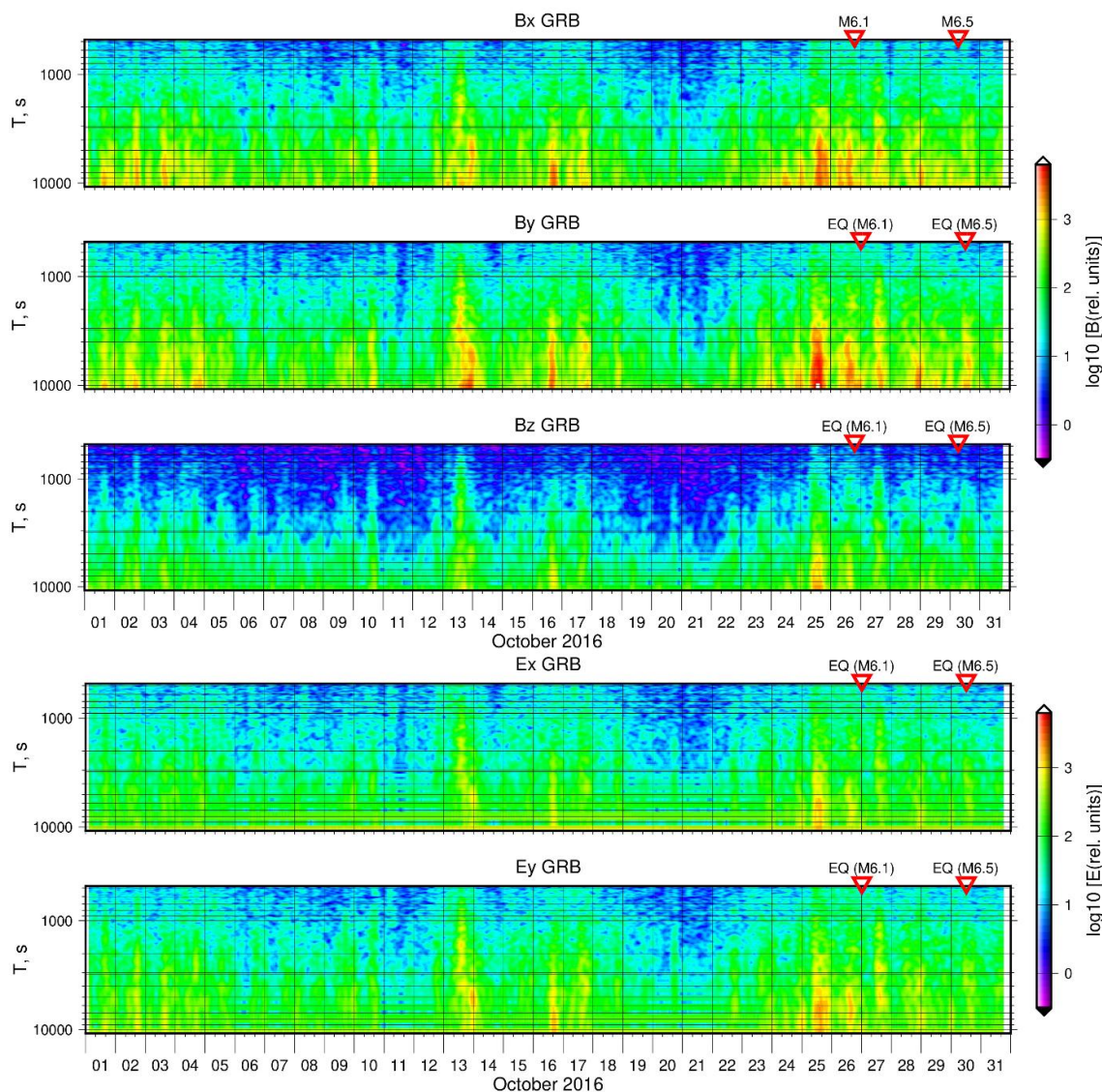


Рис. 2. Мінливість спектрів ЕМ поля з часом у точці GRB в жовтні 2016 р.
Червоними трикутниками позначені моменти Італійських землетрусів згадуваних в тексті.

До цих землетрусів, за 30 годин до першого з них, було зафіксовано збільшення спектральної густини енергії варіацій ЕМ поля. Чіткіше цей ефект можна побачити ще до землетрусу M6.2 (2016-08-24), зафіксованого в тому ж регіоні Італії. На рис. 3 показана мінливість магнітних і електричних спектрів в цій же точці GRB за згаданий період часу. Що можна відмітити на обох фігурах, вертикальна компонента Bz менш

чутлива до сейсмічних подій, ніж горизонтальні.

Аналогічна картина, теж, спостерігається на динамічних спектрах у точках KZN і SUW, за винятком електричних каналів у KZN, оскільки на них впливає помірний рівень штучних шумів присутніх в цій точці. Ми також проаналізували динамічні спектри ЕМ поля стосовно землетрусу 27 грудня 2016 року в Румунії (M5.6). Рисунки також виявили деяку активацію в геомагнітному

полі приблизно за 30 годин до сейсмічної події, як і в попередніх випадках.

Наукова новизна

Електромагнітний моніторинг типово проводиться поряд із сейсмічно активними регіонами, але згідно з теоретичними тлумаченнями деякі явища мають глобальне походження. Ми використали звичайні магнітотелуричні дані, записані в точках, розташованих у середніх широтах досить далеко від сейсмічно активних

регіонів, але ми продемонстрували, що такі глобальні зв'язки між сейсмічними та електромагнітними подіями з високою ймовірністю існують.

Практичне значення

Очевидно, розглянуті ефекти в спектрах природного ЕМ поля не можуть розглядатись як 100 %-ві передвісники сильних землетрусів, проте подібні результати можуть доповнювати інформацію про них.

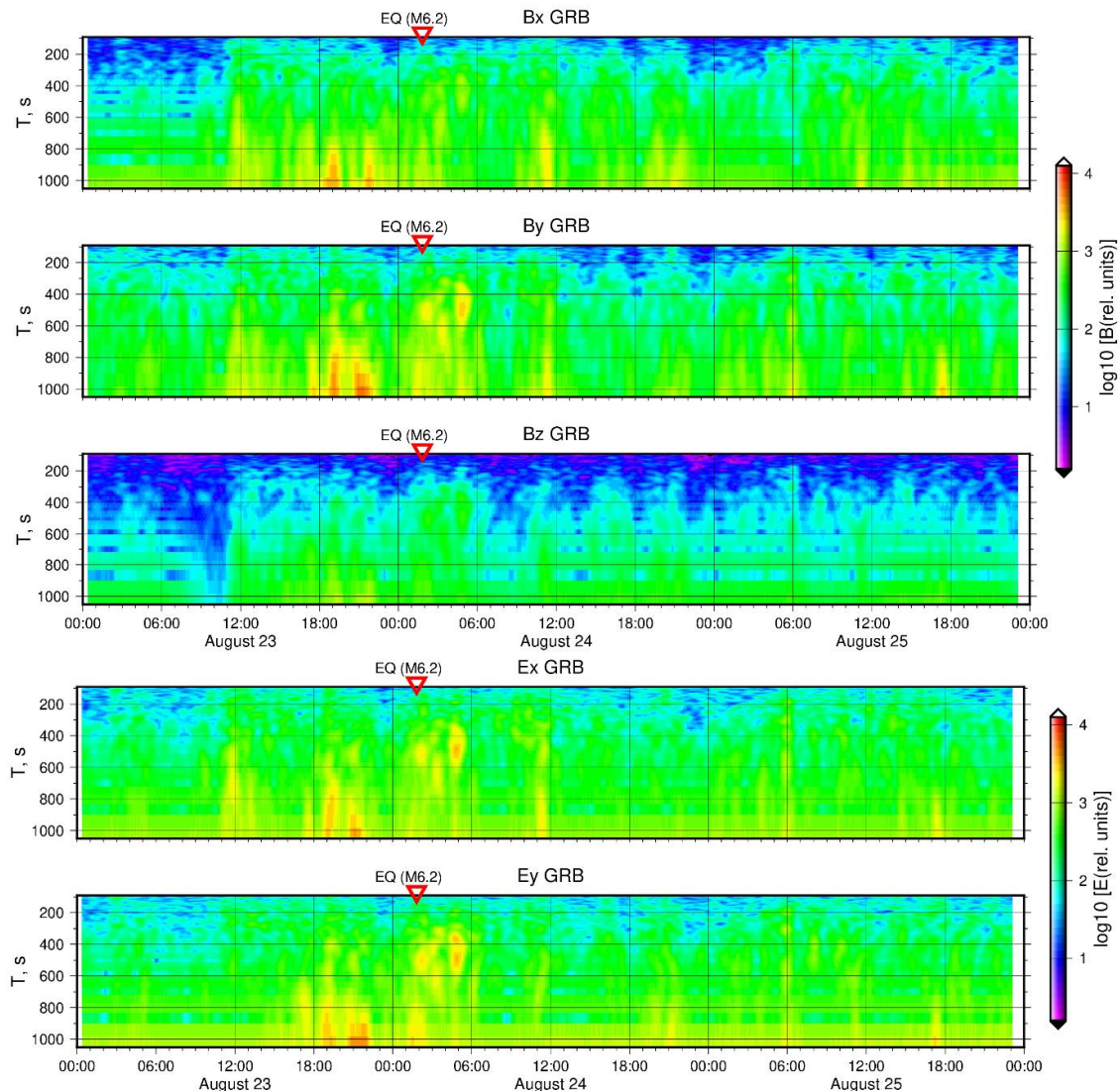


Рис. 3. Мінливість спектрів ЕМ поля з часом у точці GRB до і після землетрусу 24 серпня 2016

Обговорення і висновки

Взаємозв'язок між землетрусами та варіаціями електромагнітного поля є підґрунтям для припущення виникнення п'єзоелектричних і сейсмоелектрокінетичних явищ [Guglielmi, 2008] в ослаблених зонах і під час напружень, викликаних сейсмічними хвилями [Jarosinski, 2012] від досить потужних землетрусів [Neishtadt et al., 2006; Kurtz and Nibbled, 1978]. Перше – це зміни магнітного

поля внаслідок пружних деформацій, а друге – варіації провідності середовища за рахунок динаміки флюїдів в земній корі, обумовлених її напружено деформованим станом. Останній ефект характеризується інерцією [Svetov, 2007]. Обидва ефекти не можуть бути описані лише рівняннями Максвелла. Тому завдання майбутніх досліджень полягає в тому, щоб відокремити індукційні ефекти від інших типів явищ.

У цій роботі показано, що виявлені зміни в ЕМ спектрах реєструвались в смузі частот від декількох сотень до декількох тисяч секунд для сильних землетрусів (М6+), що відбувалися на великій відстані від точок спостережень. Збільшення спектральної густини варіацій ЕМ поля спостерігалося приблизно за 30 годин до цих подій (рис. 2, рис. 3). Крім того, на рисунку 2 показано збільшення інтенсивності в спектрах із 13 по 18 жовтня 2016 року. Що ще цікавіше, в той же час світова мережа також зареєструвала серію землетрусів М6+. Перший був зафіксований у Папуа-Новій Гвінеї 15 жовтня 2016 року з магнітудою М6.3. Таким чином, проміжок часу між зміною інтенсивності спектрів і сейсмічною подією співмірний із величиною, що аналізується в цій роботі.

Можливо, спостережувані ефекти можна пояснити збільшенням густини протонів у сонячному вітрі [Straser et al., 2016. Cataldi et al., 2016]. Існує багато даних, котрі свідчать про потенційний зв'язок між руйнівними землетрусами в глобальному масштабі та сонячною активністю. Тому необхідно розуміти, як це відбувається. Straser et al. [2016] і Cataldi et al. [2016] підтверджують, що сейсмічним подіям сильної інтенсивності (М6+), які відбуваються в глобальному масштабі, завжди передують збільшення щільності протонів у сонячному вітрі. Такі ж аномалії з'являються як інтенсивні зміни в геомагнітному полі після збільшення сонячної активності, якщо вони спостерігаються за допомогою ферозондових магнітометрів, якими реєструють магнітограми. Вони повідомляють [Cataldi et al., 2016], що беручи до уваги інтервал часу реєстрації з 1 січня 2012 року по 30 квітня 2016 року, для 604 сейсмічних подій (дані USGS), з часу початку зростання густини протонів у сонячному вітрі та початком землетрусу пройшло в середньому 140,9 годин. Середня часова різниця [Straser et al. 2016] між зафіксованою максимальною інтенсивністю електромагнітної аномалії та сейсмічною подією М6+ склала ~9 годин, при цьому мінімальна різниця становила 1 хвилину, а максимальна ~37 годин. Це добре погоджується з результатами, отриманими у нашому дослідженні.

Подяка. Ця робота підтримувалась у рамках статутної діяльності №3841/E-41/S/2017 і базується на даних з гранту №: NCN 2014/15/B/ST10/00789 Міністерства науки і вищої освіти Польщі. Автори вдячні за допомогу д-ру Пйотру Соболевському. Автори також вдячні невідомому рецензенту, чий поради покращили сприйняття тексту.

Список літератури

Bordes, C., Jouniaux, L., Garambois, S., Dietrich, M., Pozzi, J.-P., & Gaffet, S., (2008). Evidence of the theoretically predicted seismo-magnetic conversion. *Geophys. J. Int.*, 174, 489–504, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03828.x

- Cataldi, G., Cataldi, D., & Straser, V., (2016) Solar activity correlated to the M7.0 Japan earthquake occurred on April 15, *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 4 (2), 202–208.
- Guglielmi, A. V., (2008). Ultra-low-frequency electromagnetic waves in the Earth's crust and magnetosphere. *UFN*, 177, 12, 1257–1276.
- Hayakawa, M., & Hobara, Y., (2010). Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1, 2, 115–155, DOI: 10.1080/19475705.2010.486933
- Jarosinski, M., (2012). Compressive deformations and stress propagation in intra continental lithosphere: Finite element modeling along the Dinarides – East European Craton profile. *Tectonophysics*, 526–529, 24–41 doi:10.1016/j.tecto.2011.07.014.
- Kurtz, R. D., & Niblet, E. R., (1978). Time dependence of magnetotelluric fields in a tectonically active region in Eastern Canada. *J. Geomag. Geoelectr.*, 30, 561–577.
- Ladanivskyy, B., Zlotnicki, J., Reniva, P., & Alanis, P. (2018). Electromagnetic signals on active volcanoes: Analysis of electrical resistivity and transfer functions at Taal volcano (Philippines) related to the 2010 seismovolcanic crisis. *Journal of Applied Geophysics*, 156, 67–81, doi: 10.1016/j.jappgeo.2017.01.033
- Moldovan, I. A., Moldovan, A. S., Panaiotu, C. G., Placinta, A. O., & Marmureanu, Gh. (2009). The geomagnetic method on precursory phenomena associated with 2004 significant intermediate-depth Vrancea seismic activity. *Rom. Journ. Phys.*, 54 (1-2), 249–261.
- Neishtadt, N., Eppelbaum, L., Levitski, A., (2006). Application of seismo-electric phenomena in exploration geophysics: Review of Russian and Israeli experience. *Geophysics*, 71, 2, B41-B53.
- Semenov, V. Yu., Ladanivskyy, B. T., Nowozynski, K., (2011). New induction sounding tested in Central Europe. *Acta Geophysica*, 59, 5, 815–832.
- Straser, V., Cataldi, G., & Daniele, C. (2016). Earthquakes unrelated to natural geomagnetic activity: A North Korean case, *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 4, 1, March 2016, p. 105–113.
- Svetov, B. S., (2007). *Basics geoelectrics*. URSS publishing, Moscow
- Takahashi, I., Hattori, K., Harada, M., Yoshino, Ch., & Isezaki, N. (2007). Anomalous geoelectrical and geomagnetic signals observed at Southern Boso Peninsula, Japan. *Annals of Geophysics*, 50 (1), 123–135.
- Teisseyre, R., & Ernst, T. (2002). Electromagnetic radiation related to dislocation dynamics in a seismic preparation zone. *Annals of Geophysics*, 45 (2), 393–399.

V. SEMENOV¹, B. LADANIVSKYY², M. PETRISHCHEV³,

¹Institute of Geophysics, PAN, 64 Ksecia Janusza str., Warsaw, Poland, 01452, e-mail sem@igf.edu.pl

²Carpathian Branch of S.I. Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, 3-b, Naukova Str., Lviv, Ukraine, 79060; Lviv Polytechnic National University (SD ICSIT), 12, S. Bandera str., Lviv, Ukraine, 79013, tel. +380 (32)2648563, e-mail borys@cb-igph.lviv.ua

³Saint Petersburg's Branch of Institute of Earth's Magnetism, Ionosphere and Radio wave Propagation, Saint Petersburg, Russia, 199034, e-mail ms_petr@mail.ru

EMERGENCE OF EARTHQUAKES FOOTPRINT IN NATURAL ELECTROMAGNETIC FIELD VARIATIONS

Purpose. It is well-known that strong earthquakes are typically accompanied by some phenomena which relate to variations of natural electromagnetic fields. Based on the idea about the mechanism of lithosphere–atmosphere–ionosphere coupling we expect to detect some precursors of strong natural earthquakes in electromagnetic data sets recorded by magnetotelluric instruments far enough from epicenters. **Methodology.** The temporal changes of power spectral density in the natural electromagnetic field components were analyzed with respect to the earthquakes with a magnitude greater than 5 (M5+) occurring in Europe as well as worldwide. **Results.** Electrical and magnetic field variations were recorded at three sites located at two lines. The first line was placed along the Tesseyre-Tornquist Zone in Poland and the second one was perpendicular to the first. The observations have been carried out from September 2015 to April 2018. The data were recorded by standard five channels magnetotelluric instruments. The magnetic field components were measured in three orthogonal directions and electrical ones in two horizontal orthogonal directions. The spectra of the electromagnetic field components have been analyzed with respect to earthquakes with M5+ in Europe as well as around the globe. The changes in the intensity of the spectra which can be treated as earthquake precursors have been detected from 24 to 32 hours before the seismic events. The reasons for such effects are also discussed. **Originality.** The electromagnetic monitoring is typically carried out next to seismically active regions but according to theoretical explanations some of the phenomena are of global origin. We used ordinary magnetotelluric data recorded at mid latitude sites placed far enough from the seismically active regions and we show that a global relationship exists between seismic and electromagnetic events with high probability. **Practical significance.** Such results can accomplish the information about earthquake precursors.

Key words: natural electromagnetic field; spectra; earthquake; precursors.

В. Ю. СЕМЕНОВ, В. Т. ЛАДАНИВСКИЙ, М. С. ПЕТРИЩЕВ

¹Институт геофизики, ПАН, ул. Кн. Януша, 64, Варшава, Польша, 01452, sem@igf.edu.pl

²Карпатское отделение Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Львов, ул. Научная, 3-б, 79060, тел. +380 (32)2648563, borys@cb-igph.lviv.ua

³Санкт-Петербургский филиал Института магнетизма Земли, ионосферы и распространения радиоволн, Санкт-Петербург, Россия, 199034, ms_petr@mail.ru

ВЫЯВЛЕНИЕ ОТПЕЧАТКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВАРИАЦИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель. Общеизвестно, что мощные землетрясения типично сопровождаются соответствующими явлениями, относящимися к вариациям естественного электромагнитного поля. Базируясь на идеи об механизме литосферно-атмосферно-ионосферного взаимодействия, мы намереваемся выделить некоторые предвестники сильных натуральных землетрясений в наборах электромагнитных данных, зарегистрированных магнитотеллурическими станциями на достаточно большом расстоянии от эпицентров. **Методика.** Анализировались временные изменения спектральной плотности мощности в компонентах естественного электромагнитного поля по отношению к землетрясениям с магнитудой больше 5 (M5+), которые имели место в Европе, а также по всему миру. **Результаты.** Вариации электрического и магнитного полей регистрировались в трех точках, установленных на двух линиях: первая линия проходила вдоль зоны Тесера-Торнквиста в Польше, а вторая – перпендикулярно к первой. Наблюдения проводились с сентября 2015 г по апрель 2018 г. Данные регистрировались при помощи стандартных пяти канальных магнитотеллурических станций, а именно компоненты магнитного поля измерялись в трех ортогональных направлениях, а электрического – в двух ортогональных горизонтальных. Анализировались спектры компонент электромагнитного поля по отношению к землетрясениям с магнитудой M5+, которые имели место как в Европе, так и по всей планете. Изменения в интенсивности спектров, которые можно интерпретировать как предвестники землетрясений, выявлены от 24 до 32 часов перед сейсмическими событиями. Причины этих эффектов также обсуждаются в статье. **Научная новизна.** Электромагнитный мониторинг типично проводится вблизи сейсмически активных регионов, но согласно теоретических толкований некоторые явления имеют глобальное происхождение. Мы использовали обыкновенные магнитотеллурические данные, зарегистрированные в точках, расположенных в средних широтах, достаточно далеко от сейсмически активных регионов, но мы продемонстрировали, что такие глобальные связи между сейсмическими и электромагнитными событиями с большой вероятностью имеют место быть. **Практическое значение.** Такие результаты могут дополнить информацию о предвестниках землетрясений.

Ключевые слова: естественное электромагнитное поле; спектры; землетрясение; предвестники.

Надійшла 02.09.2018 р.