

OCENA ISTOTNOŚCI WPŁYWU TRANSFERU NAPRĘŻEŃ STATYCZNYCH WYWOŁANYCH PRZEMIESZCZENIEM KOSEJSMICZNYM WSTRZĄSÓW GÓRNICZYCH NA PROCES SEJSMOGENICZNY W KOPALNIACH

**Significance of static stress transfer caused by coseismic slip
of mining-induced seismic events in seismicity generation process
in mines**

Beata ORLECKA-SIKORA

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Geofizyki;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: orlecka@geol.agh.edu.pl*

Abstract: We investigated an effect of static stress transfer for the mining-induced seismicity from Rudna Mine. We consider events of energy over 10^3 J, which occurred in Rudna Mine from 1993–2006. We examine the possible triggering checking correlation between event locations and the stress-increased zones. We find that more than 50% of the analyzed seismic events occurred in areas where stress was enhanced due to the occurrence of previous events. Statistical test proved that for stress changes from 0.02 bar static stress triggering in Rudna Mine exists and this effect is statistically significant at the 95% confidence level.

Key words: induced seismicity, Rudna Mine, static stress transfer, Coulomb stress changes

Słowa kluczowe: sejsmiczność indukowana, kopalnia Rudna, transfer naprężeń statycznych, zmiany naprężenia Coulomba

WPROWADZENIE

Pojawienie się wstrząsów prowadzi w ośrodku skalnym do nagłych zmian naprężenia dynamicznego, związanych z propagacją fal sejsmicznych i naprężenia statycznego, wywołanych przemieszczeniem kosejsmicznym na uskoku. Zmiany te pojawiają się na obszarze znacznie większym niż strefa uskokowa, a ich amplituda maleje wraz z odległością (np. Chinnery 1963). Zjawisko to nazywane jest transferem naprężeń wywołanym przemieszczeniem kosejsmicznym wstrząsu. Zmiany naprężeń mogą wpływać na występowanie przyszłych wstrząsów, np. w formie mniejszych wstrząsów następczych w sąsiedztwie wstrząsu głównego, lub mogą wzbudzać wstrząsy główne na znacznych odległościach (np. Smith & Van de Lindt 1969, Das

& Scholz 1981, Stein & Lisowski 1983). Transfer naprężeń statycznych wywołany przemieszczeniem kosejsmicznym wstrząsów uważa się obecnie za jedną z możliwych przyczyn interakcji trzęsień ziemi. Nawet niewielkie zmiany statycznego naprężenia na danym obszarze, rzędu jednego bara, mogą przyspieszyć lub opóźnić pojawienie się kolejnego wstrząsu. Od kilku lat technika transferu naprężeń statycznych należy do podstawowej grupy metod wykorzystywanych w predykcji trzęsień ziemi.

Zmiany naprężenia statycznego wywołane przemieszczeniem kosejsmicznym wstrząsów górniczych są znacznie mniejsze niż wartości obserwowane podczas trzęsień ziemi. Co więcej, są one tylko małą składową zmiennego w czasie pola naprężeń w kopalniach. Sejsmiczność na terenach górniczych pojawia się w odpowiedzi na zmiany naprężenia wywołane eksploatacją, znacznie przekraczające wartości zmian naprężeń statycznych. W związku z tym, sejsmiczność ta jest spodziewana w obszarach prowadzonych prac górniczych (np. McGarr & Simpson 1997). Jednak wiele badań czasowej i przestrzennej struktury procesu sejsmogenicznego na terenach górniczych dostarcza dowodów na istnienie związków pomiędzy wstrząsami. Do nich należą m.in. zjawisko grupowania się wstrząsów w czasoprzestrzenne klastry, roje (np. Trifu *et al.* 1993, Gibowicz 1997, Orlecka-Sikora & Lasocki 2002), istnienie pamięci w procesie występowania wstrząsów (np. Kijko 1997, Węglarczyk & Lasocki 2009), dyfuzja naprężenia i jego wpływ na występowanie silnych zdarzeń (Marsan *et al.* 1999), pojawianie się dubletów i multipletów (np. Gibowicz 2006). Obserwacje z płytkich kopalń wskazują, że poza deformacjami dookoła miejsca wydobywania, pojawiają się również nieoczekiwane deformacje w znacznych odległościach od frontu eksploatacyjnego. Stiros i Kontogianni (2008) upatrują genezy tych deformacji w transferze naprężeń statycznych.

Wstępne badania zmian naprężeń statycznych na obszarze kopalni Rudna w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym (LGOM) pokazały, że zjawisko transferu naprężeń może być również obecne w procesie sejsmogenicznym w kopalniach (Orlecka-Sikora *et al.* 2008a, b, 2009a, b). Ponad 60% analizowanych wstrząsów pojawiło się w rejonach o podwyższonych wartościach naprężenia statycznego, umacniając tym samym hipotezę o istnieniu transferu naprężenia na terenach górniczych.

W niniejszej pracy analizowano wpływ sumarycznych zmian naprężeń statycznych 30-dniowych serii wstrząsów sejsmicznych z kopalni Rudna na przyszłą sejsmiczność. W tym celu porównywano obszary dodatnich zmian naprężenia statycznego z miejscem i czasem wystąpienia przyszłych wstrząsów. Korelacja pomiędzy naprężeniami a wybranymi cechami sejsmiczności może wskazywać na aktywność transferu naprężeń na analizowanym obszarze. Aby ocenić rolę zjawiska transferu naprężeń w procesie generowania wstrząsów, istotność uzyskanych wyników poddano weryfikacji statystycznej.

METODA

Zmiany naprężenia statycznego wywołane przemieszczeniem kosejsmicznym wstrząsów górniczych obliczono w oparciu o równanie dyslokacji w sprężystej, izotropowej i homogenicznej półprzestrzeni (Okada 1985, 1992). Jako kryterium pęknięcia górotworu wybrano kryterium Coulomba (Jaeger & Cook 1979, Scholz 1990), według którego pęknięcie na uskoku pojawia się po przekroczeniu naprężenia Coulomba, zdefiniowanego jako różnica pomiędzy naprężeniem ścinającym a naprężeniem normalnym pomnożonym przez efektywny współ-

czynnik tarcia wewnętrznego. Dodatkowo zmiany naprężenia Coulomba oznaczają wzrost prawdopodobieństwa pojawienia się wstrząsu, jeśli natomiast zmiany naprężenia są ujemne, prawdopodobieństwo kolejnego wstrząsu maleje.

Zmiany naprężenia statycznego są trwałe. Jednak, z uwagi na zmienne w czasie pole naprężeń w kopalniach, w pracy analizowano wpływ sumarycznych zmian naprężeń statycznych serii wstrząsów sejsmicznych w przesuającym się oknie czasowym 30 dni na lokalizację kolejnego przyszłego wstrząsu (Fig. 1). Naprężenie statyczne jest wielkością tensorową, w związku z tym dla każdego wstrząsu w serii badano zmiany naprężenia statycznego wywołane pojawieniem się wstrząsów w oknie czasowym poprzedzającym dany wstrząs w odniesieniu do geometrii uskoku reprezentującego ten wstrząs.

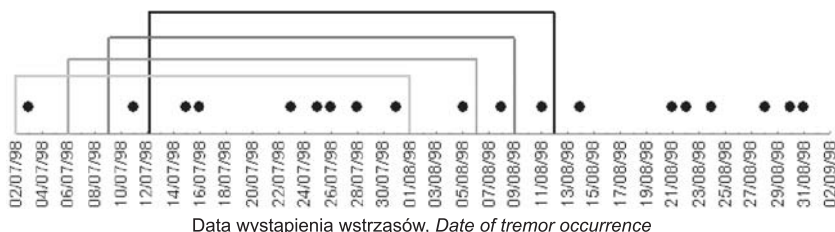


Fig. 1. Schemat analizy wpływu zmian naprężeń statycznych wywołanych kosejsmicznym przemieszczeniem wstrząsów górniczych w 30-dniowym oknie na wystąpienie przyszłego wstrząsu

Fig. 1. Schematic diagram of the analysis of the influence of the cumulative static stress changes due to seismicity from only 1 month back on future event occurrence

DANE

W modelowaniach zmian naprężeń Coulomba wykorzystuje się cztery grupy danych wejściowych. Pierwszą z nich stanowią kopalniane katalogi sejsmologiczne, dostarczające informację o lokalizacji, czasie wystąpienia i wielkości wstrząsów. W pracy wykorzystano katalog sejsmiczny pochodzący z kopalni Rudna z okresu między czerwcem 1993 a grudniem 2006, z którego do analizy wybrano dane o 770 wstrząsach o magnitudzie lokalnej (ML) od 2.0. Rozkład powierzchniowy analizowanych wstrząsów przedstawiono na figurze 2.

Dwie kolejne grupy danych, tj. parametry opisujące geometrię płaszczyzn uskoków i parametry spektralne źródeł sejsmicznych, oszacowane zostały przez Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Rozwiązania mechanizmu ogniska wstrząsów dostarczają informacji o geometrii dwóch płaszczyzn, z których jedna jest płaszczyzną uskokową a druga pomocniczą. Ze względu na brak dodatkowej informacji, umożliwiającej selekcję właściwej płaszczyzny, w modelowaniach wybrano płaszczyznę uskokową w sposób losowy.

Ostatnią grupę danych wejściowych stanowią parametry geomechaniczne ośrodka skalnego. W pracy przyjęto moduł sztywności równy $2.2 \cdot 10^4$ MPa, współczynnik Poissona równy 0.25 oraz efektywny współczynnik tarcia równy 0.8 (Piestrzyński 1996). Wybrane wartości parametrów odpowiadają średnim warunkom geomechanicznym w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym, gdzie strefa sejsmogeniczna zbudowana jest z wapieni, dolomitów, anhydrytów i piaskowców.

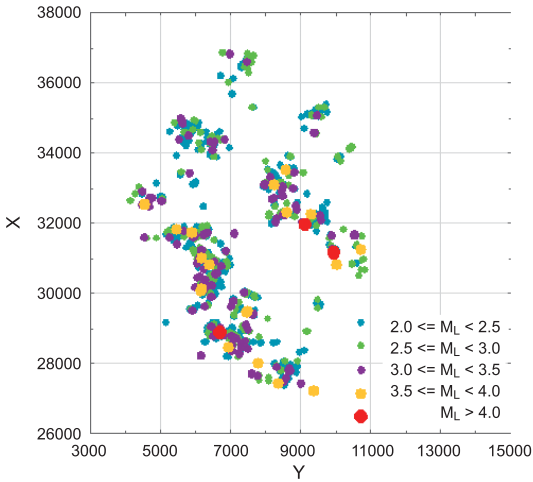


Fig. 2. Rozkład powierzchniowy analizowanych wstrząsów o M_L od 2.0, zarejestrowanych na terenie kopalni Rudna w okresie 06.1993 – 12.2006

Fig. 2. Spatial distribution of the analyzed tremors of the local magnitude from 2.0, recorded in Rudna mine in the period between 06.1993 – 12.2006

WYNIKI

Na figurze 3A przedstawiono częstość występowania wstrząsów w funkcji zmian naprężenia Coulomba dla całego zbioru danych, natomiast na figurze 3B dla silniejszych wstrząsów, o momencie sejsmicznym większym lub równym $1.0 \cdot 10^{14}$ [N·m]. Około 53% analizowanych wstrząsów pojawiło się w obszarach o dodatnich zmianach naprężenia Coulomba, spowodowanych przeszłą aktywnością sejsmiczną. Większość z tych zdarzeń zlokalizowana była w miejscach, gdzie zmiany naprężenia przekroczyły 0.1 bara. W przypadku wstrząsów silniejszych, procent zdarzeń, których lokalizacja korelowała z pozytywnymi zmianami naprężenia, wzrósł do 58.

W obu przypadkach procent wstrząsów, których lokalizacja była zgodna z obszarami wzrostu naprężenia Coulomba, jest niewiele większy od 50%. Takie wyniki mogą wskazywać na nieistotną rolę transferu naprężeń statycznych w procesie generowania wstrząsów sejsmicznych na badanym obszarze. Jeśli transfer naprężeń nie wpływa na czas i miejsce wystąpienia przyszłego wstrząsu, to obliczony procent wstrząsów nie będzie się istotnie różnił od wyników uzyskanych dla jakiegokolwiek sekwencji zdarzeń, będącej losową kombinacją analizowanych wstrząsów. Sekwencje takie zachowują parametry wstrząsów, natomiast utracą wszystkie istniejące związki czasowe pomiędzy zdarzeniami. Aby więc sprawdzić, czy uzyskane wyniki są istotne statystycznie, testowano hipotezę zerową, że proporcja wstrząsów zlokalizowanych na obszarach pozytywnych zmian naprężeń Coulomba, oszacowana dla rzeczywistej sekwencji wstrząsów, nie jest istotnie większa od proporcji wstrząsów oszacowanej dla serii zdarzeń, w której kolejność wstrząsów została zmieniona losowo. W tym celu wygenerowano 2000 permutacji rzeczywistej serii wstrząsów i dla każdej z nich przeprowadzono modelowanie zmian naprężeń Coulomba w taki sam sposób, jak dla pierwotnego zbioru. Hipoteza zerowa zostanie odrzucona na poziomie istotności 0.05 wówczas, gdy proporcja wstrząsów w rzeczywistym katalogu będzie większa od 95%. wartości krytycznej otrzymanego rozkładu syntetycznych proporcji.

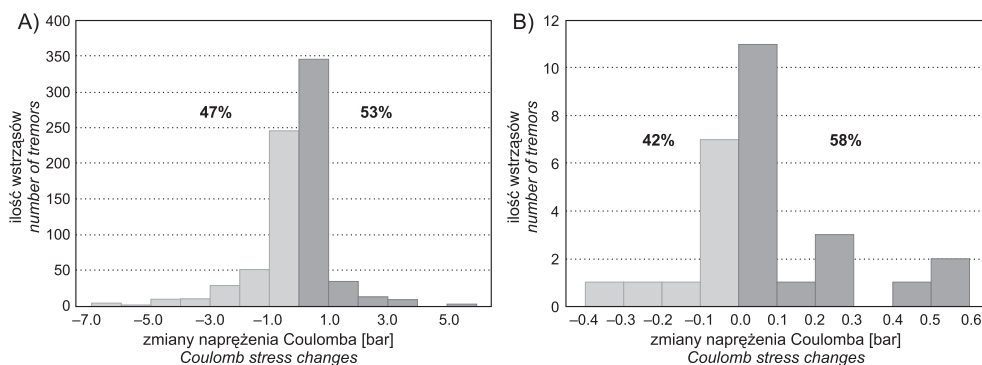


Fig. 3. Rozkład częstości występowania wstrząsów w funkcji zmiany naprężenia Coulomba dla wstrząsów: A) o momencie sejsmicznym $M_0 \geq 2.7 \cdot 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}$; B) o momencie sejsmicznym $M_0 \geq 1.0 \cdot 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$, zarejestrowanych na terenie kopalni Rudna w okresie 06.1993 – 12.2006.

Fig. 3. Histogram of the frequency of the occurrence of seismic events of: A) seismic moment $M_0 \geq 2.7 \cdot 10^{11} \text{ [N} \cdot \text{m]}$; B) seismic moment $M_0 \geq 1.0 \cdot 10^{14} \text{ [N} \cdot \text{m]}$, that occurred during 06.1993 – 12.2006 in the Rudna Mine as a function of Coulomb stress changes

Hipotezę zerową testowano dla różnych wartości progowych zmian naprężenia Coulomba. Empiryczny rozkład proporcji wstrząsów zlokalizowanych na obszarach, na których zmiany naprężenia Coulomba wzrosły przynajmniej o 0.1 bara, przedstawiono na figurze 4.

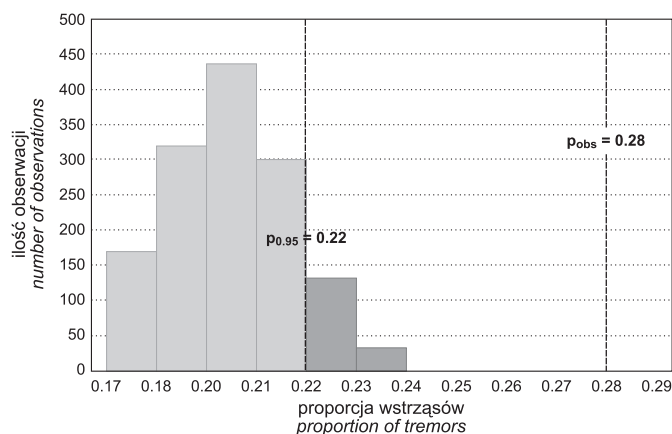


Fig. 4. Empiryczny rozkład proporcji wstrząsów zlokalizowanych na obszarach, gdzie zmiany naprężenia Coulomba przekroczyły wartość 0.1 bara, oszacowanych dla syntetycznych serii zdarzeń. Kolorem ciemniejszym zaznaczono obszar powyżej krytycznej wartości rzędu 95%, równej 0.22. Proporcja wstrząsów dla rzeczywistego katalogu dla zmian naprężenia Coulomba od 0.1 bara wynosi 0.28

Fig. 4. Empirical distribution of the proportion of events located inside areas with Coulomb stress changes equal to or greater than 0.1 bar for the synthetic series of events. Dark gray areas in the histogram denotes values greater than the 95% critical value of the distribution, which is equal to 0.22. The proportion of events for the observed catalog for the Coulomb stress changes equal to or greater than 0.1 bar is 0.28

Proporcja wstrząsów dla rzeczywistego katalogu dla zmian naprężenia Coulomba od 0.1 bara, równa 0.28, przekracza wartość krytyczną rzędu 95% rozkładu, wynoszącą 0.22, dając podstawę do odrzucenia hipotezy zerowej na poziomie istotności 5%. Wynik ten wskazuje na istotną statystycznie różnicę pomiędzy wynikami dla rzeczywistej sekwencji wstrząsów a wynikami dla serii zdarzeń, w których zostały usunięte związki czasowe pomiędzy zdarzeniami. Najmniejsza wartość zmian naprężenia Coulomba, dla której hipoteza zerowa została odrzucona na poziomie istotności 5%, wynosiła 0.02 bara.

WNIOSKI

W pracy badano wpływ sumarycznych zmian naprężenia Coulomba 30-dniowych serii wstrząsów sejsmicznych z kopalni Rudna na miejsce i czas wystąpienia przyszłych wstrząsów. Jako kryterium sukcesu wybrano proporcję wstrząsów, które zlokalizowane były na obszarach, gdzie naprężenie Coulomba wzrosło na skutek przeszłej aktywności sejsmicznej. Dla całego zbioru danych otrzymano proporcję równą 53%, natomiast dla silniejszych wstrząsów, o momencie sejsmicznym większym lub równym $1.0 \cdot 10^{14}$ N·m, 58%. Zastosowany test statystyczny dowiódł na poziomie istotności 5%, że dla obszarów, na których naprężenia Coulomba wzrosły przynajmniej o 0.02 bara na skutek przeszłej aktywności sejsmicznej, istnieje statystycznie istotny związek pomiędzy lokalizacją przyszłych wstrząsów a zmianami naprężenia Coulomba. Oznacza to, że na obszarze kopalni Rudna silniejsze wstrząsy górnicze są w stanie na tyle zmienić pole naprężeń, że wpływa to istotnie na zwiększenie prawdopodobieństwa pojawienia się kolejnego wstrząsu.

Oszacowana proporcja wstrząsów, których lokalizacja jest skorelowana z dodatnimi zmianami naprężenia Coulomba, nie jest wysoka. Powodem mogą być błędy lokalizacji wstrząsów, które dla kopalni Rudna wynoszą około ± 50 m dla składowych poziomych i znacznie więcej dla składowej pionowej. Kolejnym źródłem niepewności jest losowy wybór płaszczyzny uskoku spośród dwóch płaszczyzn nodalnych. Jednak, uzyskane wyniki wskazują na potencjał techniki transferu naprężeń w krótko i średnioterminowej analizie zagrożenia sejsmicznego.

Praca została przygotowana w ramach projektu badawczego PBS-Grecja/10/2007, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007–2009.

Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.

LITERATURA

- Chinnery M.A., 1963. The state of stress changes that accompany strike-slip faulting. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 53, 921–932.
- Das S. & Scholz C.H., 1981. Theory of time-dependent rupture in the earth. *J. Geophys. Res.*, 86B, 6039–6051.
- Gibowicz S.J., 1997. An anatomy of a seismic sequence in a deep gold mine. *Pure Appl. Geophys.*, 150, 393–414.

- Gibowicz S.J., 2006. Seismic doublets and multiplets at the Polish coal and copper mines. *Acta Geophys.*, 54, 142–157. DOI 10.2478/s11600-006-0014-y.
- Jaeger J.C. & Cook N.G.W., 1979. *Fundamentals of rock mechanics* (3rd ed.). Chapman & Hall, London, 1–593.
- Kijko A., 1997. Keynote lecture: seismic hazard assessment in mines. W: Gibowicz S.J. & Lasocki S. (eds), *Rockbursts and Seismicity in Mines*, Balkema, Rotterdam, 247–256.
- Marsan D., Bean Ch.J., Steacy S. & McCloskey J., 1999. Spatio-temporal analysis of stress diffusion in mining-induced seismicity system. *Geophysical Research Letter*, 26, 3697–3700.
- McGarr A. & Simpson D.W., 1997. Keynote lecture: a broad look at induced seismicity. W: Gibowicz S.J. & Lasocki S. (eds), *Rockbursts and Seismicity in Mines*, Balkema, Rotterdam, 385–396.
- Okada Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of Seismological Society of America*, 75, 1135–1154.
- Okada Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of Seismological Society of America*, 82, 1018–1040.
- Orlecka-Sikora B. & Lasocki S., 2002. Clustered structure of seismicity from the Legnica-Głogów copper district. *Publications of Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences*, M-24(340), 105–119.
- Orlecka-Sikora B., Papadimitriou E.E. & Kwiatek G., 2008a. Study of the interaction among mining induced seismic events in the Legnica-Glogow Copper District, Poland. W: *31st General assembly of the European Seismological Commission, 7–12 September 2008*, Hersonissos, Crete, Greece, 183–184.
- Orlecka-Sikora B., Papadimitriou E.E. & Kwiatek G., 2008b. Triggering Effect of the Static Stress Transfer in Mining-Induced Seismicity from Rudna Mine in the Legnica–Głogów Copper District, in Poland. *AGU Fall Meeting, 15–19 December 2008*, San Francisco, USA, S21B-1811.
- Orlecka-Sikora B., Papadimitriou E.E. & Kwiatek G., 2009a. A study of the interaction among mining induced seismic events in the Legnica-Glogow Copper District, Poland. *Acta Geophysica*, 58, 2, DOI: 10.2478/s11600-008-0085-z.
- Orlecka-Sikora B., Papadimitriou E.E. & Kwiatek G., 2009b. Significance of Static Stress Transfer in Mining-Induced Seismicity Generation Process, the Case Study of Rudna Mine in the Legnica–Głogów Copper District in Poland. *International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, I General Assembly, S4: Induced seismicity, Scientific Program*, Cape Town (RPA), 10–16 January 2009, 31.
- Piestrzyński A., 1996. *Monografia KGHM Polska Miedź SA*. Centrum Badawczo-Projektowe Miedzi „Cuprum”, Wrocław.
- Scholz C.H., 1990. *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge University Press, Cambridge (U.K.), 439.
- Stiros S.C. & Kontagianni V.A., 2008. Coulomb stress changes: from earthquakes to underground excavation failures. *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, doi: 10.1016/j.ijrmmms.2008.09.013.
- Smith S.W. & Van de Lindt W., 1969. Strain adjustments associated with earthquakes in southern California. *Bulletin of Seismological Society of America*, 59, 1569–1589.

- Stein R.S. & Lisowski M., 1983. The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: Control of aftershocks and postseismic deformation. *Journal of Geophysical Research*, 88, 6477–6490.
- Trifu C.I., Urbancic T.I. & Young, R.P., 1993. Non-similar frequency-magnitude distribution for $M < 1$ seismicity. *Geophysical Research Letter*, 20, 427–430.
- Węglarczyk S. & Lasocki S., 2009. Memory effect in parameterizations of mining-induced seismic process. *International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, I General Assembly, S4: Induced seismicity, Scientific Program*, Cape Town (RPA), 10–16 January 2009, 31.