



## Czasoprzestrzenne związki pomiędzy sezonowymi zmianami pozycji stacji GNSS a wysokoenergetycznymi wstrząsami sejsmicznymi w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym

### Spatiotemporal relations between seasonal changes of positions of GNSS stations and high energy tremors in The Upper Silesian Coal Basin

Dr hab. inż. Zbigniew Szczerbowski\*

**Treść:** Omówiono wyniki permanentnych pomiarów pozycji stacji sieci GNSS (ang. *Global Navigation Satellite Systems*) celem określenia ewentualnych związków pomiędzy charakterystyką szeregów czasowych opisujących zmiany pozycji tej stacji a wystąpieniem wysokoenergetycznych zdarzeń sejsmicznych na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wykazano relacje czasowe pomiędzy obserwowaną sezonową zmiennością składowych horyzontalnych pozycji stacji wyznaczonych dzień po dniu z dobowych rozwiązań dla okresu 2008-2014 i tymi zdarzeniami. Zdarzenia o energii  $E > 10^7$  J miały miejsce zwykle w okresach, w których stacja wykazywała sezonowe przemieszczenia dla składowej N. Związki czasowe są szczególnie widoczne w przypadku wstrząsów zlokalizowanych w niedalekich odległościach od miejsca realizowanych pomiarów (stacja KATO).

**Abstract:** Results of permanent measurements of positions of GNSS stations are examined to determine eventual relations between characteristics of time series depicting changes of the positions and high energy seismic events in the area of The Upper Silesian Coal Basin. So temporal relations between seasonal changeability of the horizontal positions of the stations determined day by day from diurnal solutions for the period of 2008-2014 and those events are reported. Events with energy  $E > 10^7$  occurred usually in time intervals, when KATO GNSS station demonstrated seasonal displacements of N coordinate. Temporal relations are particularly clear in case of tremors located in near distances from the measurements (KATO station).

#### Słowa kluczowe:

pomiary przemieszczeń, GNSS, ASG-EUPOS, wstrząsy sejsmiczne

#### Key words:

displacement measurements, GNSS, ASG-EUPOS, seismic tremors

## 1. Wprowadzenie

Naturalny stan naprężeń ośrodka skalnego (górotworu) zależy od wielu czynników, takich jak: ciężar nadkładu, tektonika itp. Stan ten naruszony robotami górniczymi, prowadzi do lokalnych zaburzeń wzrostu lub zmniejszenia naprężeń. Wyjściowy stan ma zasadnicze znaczenie w procesie deformacji i zmian w polu naprężeń górotworu.

Sejsmiczność wywołwana przez górnictwo i trzęsienia ziemi ma te same podstawowe mechanizmy powstawania zjawisk sejsmicznych, chociaż występują w różnych skalach i charakteryzują się różnymi amplitudami oraz głębokościami występowania, jak również efektami powierzchniowymi (różnice w wielkości intensywności, czasu trwania intensywnej fazy wstrząsów itp.). Inną, wspólną cechą jest trudność w prognozowaniu wspomnianych zjawisk, jednak prognoza trzęsienia ziemi odnosi się do rejonu o znacznej powierzchni, podczas gdy prognoza tąpnięcia dotyczy najczęściej pojedynczego wyrobiska, co przekłada się na różnice w dokładności określenia miejsca wystąpienia wstrząsu górniczego i dokładności prognozy rejonu, w którym może nastąpić trzęsienie Ziemi (Goszcz 2003).

Duża liczba prac poświęconych problemowi modelowania naprężeń w górotworze dla potrzeb prognozowania zjawisk

sejsmicznych bazuje na różnego typu danych geofizycznych. Prawdopodobnie większość z nich poświęcona była obszarowi Kalifornii, gdzie na dużą skalę prowadzony jest monitoring geodynamiczny z powodu ciągłych zagrożeń trzęsieniem ziemi na skutek ruchu płyt tektonicznych na styku Pacyfiku i Ameryki Północnej.

Ponieważ zmiany stanu naprężeń uwarunkowane są deformacjami wywołanymi przemieszczeniami płyt tektonicznych, to w ramach monitoringu prowadzone są pomiary GNSS na około tysiącu (sic!) stacji wielu sieci (PBO, NASA GGN, COCONet, TLALOCNet, Principle Investigator). Poza stacjami GNSS prowadzony jest monitoring w ramach sieci z zastosowaniem różnego rodzaju przyrządów czujnikowych jak np. sejsmometry otworowe, ekstensometry laserowe długich baz, inklinometry itp. Szeroki przegląd tych prac, jak również ich wyniki są dostępne na stronach internetowych wielu instytucji, takich jak [us.usg.gov](http://us.usg.gov) lub [unavco.org](http://unavco.org). Analiza mechanizmu ognisk wstrząsów analizowana jest na podstawie danych GNSS, jak i geofizycznych, a analiza zagrożenia trzęsieniem ziemi w strefie aktywnych uskoku Kalifornii obejmuje m.in. ocenę prędkości poślizgu uskoku. Chociaż wyniki danych geologicznych nie zawsze odpowiadają geodezyjnym ocenom, to jednak w modelowaniu akumulacji odkształceń międzysejsmicznych opartym na geologicznych i geodezyjnych wskaźnikach poślizgu wyznaczonych z uwzględnieniem charakterystyki historycznych wstrząsów

\* ) Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH, Kraków

upatruje się możliwości w lepszym rozumieniu mechanizmu zjawisk sejsmicznych oraz redukcji zagrożeń nimi wywołanych (McCaffrey 2005, Lohmal i in. 2007, Tong i in. 2014).

Przewidywanie naturalnych trzęsień ziemi, a zwłaszcza określenie prekursorów trzęsień ziemi jest więc celem wspólnych badań geofizycznych i geodezyjnych. Stąd szereg prac geodezyjnych poświęconych badaniom trzęsień ziemi. W przypadku pomiarów geodezyjnych istotna jest ocena deformacji, które poprzedzają trzęsienia ziemi i które wyznaczone są na podstawie przemieszczeń mierzonych zwykle techniką GNSS, ale umożliwiają również monitorowanie skutków trzęsień ziemi, w tym ocenę relaksacji po zdarzeniach sejsmicznych, szacowanie deformacji dużych konstrukcji inżynierskich, zestawianie danych satelitarnych różnego typu, które mogą być wykorzystywane przez specjalistów z zakresu inżynierii lądowej (Feigl 2002; Crowell i in. 2012, Melgar i in. 2012).

Budowa geologiczna w dużym stopniu warunkuje mechanizm wstrząsów górniczych, jak i odprężenie istniejącego w górotworze pola naprężeń. Problem jego opisu komplikuje znacząco eksploatacja wielopokładowa, gdzie obserwuje się zaskakujące zjawiska sejsmiczne, które mają miejsce nawet w sytuacji braku warstw zdolnych do akumulacji energii sprężystej i jej dynamicznego uwalniania (Majcherczyk, Niedbalski 2017).

Podczas gdy badania geodezyjne odgrywają ważną rolę w wielu programach naukowych na świecie, w obserwatoriach, w sieciach lub na polach testowych, włączonych często w zintegrowany system obserwacji interdyscyplinarnych, dostarczając fundamentalnie ważnych zbiorów danych w badaniach trzęsień ziemi, to niewystarczająca jest ich rola w krajowych badaniach nad sejsmicznością indukowaną górnictwem. Tak więc dotychczasowe osiągnięcia w zakresie łączenia aspektów geofizycznych i geodezyjnych do modelowania deformacji górotworu wywołanych wstrząsami górniczymi lub uwalnianiem energii sejsmicznej pozostają niewystarczające.

W artykule przedstawiono analizę danych GNSS w aspekcie wysokoenergetycznych wstrząsów na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). W tym celu przeanalizowano charakterystykę przemieszczeń rejestrowanych w stacji KATO systemu ASG-EUPOS (Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS) zlokalizowanej w Katowicach w okresie 2008-2014. Przeanalizowano rozwiązania dobowe współrzędnych stacji KATO, a uzyskane charakterystyki zestawiono z momentami wspomnianych zdarzeń sejsmicznych.

Obserwowana zmienność pozycji GNSS dała asumpt do wykorzystania danych kinematycznych, które dają pogląd o przemieszczeniach i odkształceniach oraz powiązania ich ze zdarzeniami sejsmicznymi o wysokiej energii, które miały miejsce na obszarze GZW. Celem przeprowadzonej analizy była próba oceny charakterystyki szeregów czasowych dobowych pozycji ww. stacji, która odzwierciedla wystąpienie wstrząsów sejsmicznych o energii  $\geq 10^7$ J. Wcześniej jednak przedstawiono w sposób syntetyczny stan wiedzy (listę prac poświęconych) jaki zgromadzony został przez lata w zakresie zastosowania metod geodezyjnych w ocenie zagrożenia sejsmicznego w Polsce.

Zaprezentowano pewną nowość w krajowej literaturze jaką jest zastosowanie danych GNSS w kontekście aktywności sejsmicznej obszaru GZW. Podobna analiza została wykonana ostatnio również dla obszaru LGOM, gdzie wykazane zostały związki pomiędzy zmianami pozycji stacji GNSS a wystąpieniem wysoko energetycznych wstrząsów sejsmicznych (Szczerbowski, 2019).

## 2. Wstrząsy sejsmiczne w świetle danych geodezyjnych

Wysoka aktywność sejsmiczna obszarów objętych eksploatacją w GZW jest jednym z najbardziej istotnych zagrożeń naturalnych w kopalniach GZW. W przypadku wysokoenergetycznych wstrząsów, za które w przypadku obszaru GZW przyjmuje się te o energii  $E \geq 10^5$ J. Z uwagi na ich intensywność można porównywać zjawisko z niektórymi trzęsieniami ziemi na aktywnych tektonicznie obszarach (Gibowicz i Kijko 1994, Zembaty 2004).

W warunkach prowadzonej eksploatacji pokładów węgla kamiennego w GZW występują wstrząsy górotworu (Knopik i in., 2015):

- związane bezpośrednio z prowadzoną eksploatacją, których energia sejsmiczna i liczba odpowiada określonym warunkom geologiczno-górnictwem;
- wstrząsy incydentalne, które występują w szczególnych warunkach (resztki pokładu, krawędzie, uskoki) i są one również związane z prowadzoną eksploatacją, ale ich energia sejsmiczna ( $\geq 10^7$ J) jest większa od średniej wartości energii wstrząsów eksploatacyjnych;
- wstrząsy regionalne (o energii sejsmicznej rzędu  $10^8$ - $10^9$ J), występują sporadycznie i są rezultatem naruszenia pierwotnego stanu górotworu w danym rejonie, a których przyczyn nie udaje się jednoznacznie powiązać z aktualnie prowadzonymi robotami lub których udział w spowodowaniu takich wstrząsów nie pozostaje w żadnej proporcji do wartości wyzwolonej energii sejsmicznej (Stec i in. 2011, Idziak i in. 1999).

Z powyższego podziału wynika, że w analizach sejsmicznej aktywności obszaru GZW istotną rolę odgrywa tektonika, a dwumodalność rozkładu sejsmiczności indukowanej jest specyficzną cechą tego obszaru. Zwykle przyjmuje się, że wstrząsy o energii  $\geq 10^5$ J, uznawane jako wysokoenergetyczne są efektem współdziałania naprężeń eksploatacyjnych i tektonicznych. Zagadnienie to było omawiane w wielu pracach z zakresu sejsmologii górniczej (Kijko i in. 1985, Kijko 1986, Kijko i in. 1986, Dubiński, Stec 2000, Gibowicz, Kijko 1994, Stec 2002, Pilecka 2015, Stec, Mutke 2016). Z kolei problematyka naprężeń tektonicznych i geologicznych uwarunkowań wstrząsów regionalnych omawiana była m.in. w pracach: Gibowicz 1996, Idziak i in. 1999, Dubiński i in. 1999; Zuberek i in., 1996; Jura 1999.

Zmiany naprężeń w górotworze wywołane robotami górniczymi zawsze wiążą się z jego przemieszczeniami, które mogą prowadzić do przesuwania się bloków skalnych wzdłuż wcześniej istniejących płaszczyzn osłabienia górotworu, w tym stref nieciągłości. W przypadku samoistnych wstrząsów sejsmicznych w rejonie Kalifornii, wynikają one z ruchów tektonicznych bloków skalnych, jako procesu ciągłego, choć zmiennego w czasie. W wyniku przemieszczeń, zachodzi koncentracja naprężeń, która w trakcie wstrząsu uwalniana jest dynamicznie. Jak wykazują badania, mechanizm ww. wstrząsów zachodzi w płaszczyźnie uskoku, podobnie jak ruch bloków skalnych wyznaczony na podstawie pomiarów z zastosowaniem techniki GNSS i InSAR (Lohman, McGuire, 2007). Także w przypadku obszaru GZW najczęstszym typem mechanizmu ognisk wstrząsów regionalnych jest mechanizm poślizgowy normalny. Orientacje płaszczyzn pęknięcia dla tych zjawisk korelują z rozciągłością i upadem uskoków, które zlokalizowane są w ich sąsiedztwie (Stec 2002, Stec, Mutke 2016).

Jeżeli mechanizmy powstawania zjawisk sejsmicznych na skutek przyczyn naturalnych i antropogenicznych są podobne, to zachodzi pytanie: *na ile doświadczenia z zakresu związków pomiędzy trzęsieniami ziemi a ruchem uskoków, uwarunkowanych sezonowymi zmianami hydrologicznymi,*



można przenieść na obszar GZW? Związki takie zaobserwowano m.in. na obszarze Kalifornii i Himalajów (Matsumura 1986, Gao i in. 2000, Christiansen i in. 2007, Dutilleul i in. 2015, Craig i in. 2017).

Wieloletnie doświadczenie badawcze w polskim górnictwie dostarczyło wielu interesujących wyników dotyczących wstrząsów i tąpnięć, ale niewiele jak dotąd jest opracowań, w których ta problematyka omawiana jest w kontekście deformacji wyznaczanych z zastosowaniem metod geodezyjnych. Badania metodą niwelacji m.in. przeprowadził Wanior i stwierdził, że zjawiska sejsmiczne w wielu przypadkach poprzedzone są przemieszczeniami pionowymi, które występują w wyrobiskach podziemnych (Wanior 1983). Wartości przemieszczeń różniły się od tych, których należało oczekiwać na podstawie modeli ruchów górotworu i co więcej, miały one charakter wypiętrzeń, bezpośrednio poprzedzających wstrząsy górnicze. Ich wartości były proporcjonalne do energii wstrząsów lub tąpnięć.

Podobne wyniki dostarczyły obserwacje z zastosowaniem techniki GNSS. Podczas eksploatacji ścianowej w Kopalni Węgla Kamiennego „Pokój” czasowy rozkład przemieszczeń pionowych wyznaczony dla stacji GNSS na tym obszarze wykazał przed wystąpieniem wstrząsu wypiętrzenia lub spowolnienie procesu obniżenia (Sokoła-Szewiwoła 2011). Bezpośrednio przed nim zaobserwowano wzrost wartości obniżenia, który trwał jeszcze kilka godzin po wystąpieniu wstrząsu. Wg V. Sokoły-Szewiwoły zaburzenie procesu deformacji wystąpiło przed każdym z analizowanych wstrząsów i można je uznać za predyktor wstrząsów indukowanych w wyniku eksploatacji pola ścianowego.

Badania Szczerbowski i Jury (2015) poświęcone charakterystyce przemieszczeń stacji ASG-EUPOS w LGOM w trakcie wysokoenergetycznych zjawisk sejsmicznych, na podstawie analizy szeregu czasowych danych GNSS, pokazały zależność pomiędzy amplitudą przemieszczeń pionowych (w tym wypiętrzeń) obserwowanych na stacjach GNSS a odległością od epicentrum analizowanych wstrząsów. W przypadku obszaru LGOM i wspomnianych danych GNSS zaobserwowano również związek pomiędzy wystąpieniem wysokoenergetycznych wstrząsów sejsmicznych a charakterystyką składowych poziomych pozycji stacji GNSS. Co prawda ich czasowa charakterystyka w dużym stopniu oddaje zjawiska sezonowe, jednak wyraźna prawidłowość istnieje pomiędzy tymi zdarzeniami a skróceniami odległości pomiędzy stacjami, którą wyznaczono na podstawie pozycji dobowych stacji (Szczerbowski 2019). W niniejszej pracy wykonana została analogiczna analiza dla obszaru GZW, z zastosowaniem danych ze stacji KATO sieci ASG-EUPOS.

Jak dotąd brak jest istotnych badań w warunkach polskich obszarów górniczych, które łączyłyby geofizyczne i geodezyjne obserwacje w modelowaniu deformacji górotworu wywołanego wstrząsami górniczymi. Zaledwie kilka prac geodezyjnych (Wanior 1983, Popiołek i in. 2001, Szczerbowski, Jura 2015) poświęcono temu tematowi, i niestety są one oparte na skromnych danych geodezyjnych (liczba punktów, rozkład przestrzenny, częstotliwość pomiarów itp.). Można uznać je za wstępne, obiecujące badania nad problemem prekursorów wstrząsów górniczych. Do perspektywicznych obszarów badawczych można zaliczyć rejon pomiarów na stacjach permanentnych GPS/GNSS, gdzie analizowanie i interpretacja szeregu czasowych ciągów liczbowych, jako niezależnych danych z obserwacji daje nowe możliwości interpretacyjne. Rozkłady te są często efektem cyklicznych procesów, które nie przejawiają się w charakterystyce przemieszczeń punktów w pomiarach nieciągłych (sezonowych). Charakterystyka rozkładów czasowych to często efekt nie do końca zbadanych zjawisk i procesów związanych z kinematyką danego obszaru.

Ponadto pomiary GNSS dostarczają jedynie informacji o kinematyce powierzchni terenu dla stosunkowo dużego obszaru i często brak jest szczegółowych informacji o parametrach deformacji ze względu na ograniczoną rozdzielczość wynikającą z rozmieszczenia stacji permanentnych (Lengliné i in. 2012). Problem taki występuje w przypadku obszaru GZW. W ocenie występowania ewentualnych związków pomiędzy charakterystyką czasowych rozkładów wzajemnych pozycji stacji GNSS a momentami występowania wysokoenergetycznych zdarzeń sejsmicznych, duża liczba tych stacji nie jest istotna.

### 3. Analiza danych GNSS

Analiza obejmuje zmiany współrzędnych geodezyjnych zarejestrowanych przez stację KATO sieci ASG-EUPOS, trend zmian, przemieszczenia oraz ich sezonowość. Przeanalizowano zmiany pozycji tej stacji celem wyznaczenia czasowych charakterystyk oraz ich zestawienie z wystąpieniem wysokoenergetycznych zjawisk.

Założono, że relacje między pozycjami stacji mogą być efektem ruchu podłoża wywołanego prowadzoną eksploatacją górniczą lub czynnikami naturalnymi. Do nich można zaliczyć m.in. naturalne ruchy podłoża wynikające z czynników hydrologicznych. Wartości współrzędnych i długości wspomnianych wektorów są obciążone błędami funkcjonowania systemu GPS, które mają wpływ na uzyskane charakterystyki rozkładów (w tym w szczególności: trend, sezonowość).

Analizę zmian składowych pozycji stacji KATO wykonano w odniesieniu do wartości stwierdzonych w pomiarach w dniu 1 czerwca 2008 r., tj. od daty, kiedy ASG-EUPOS (Active Geodetic Network), krajowy system precyzyjnego pozycjonowania satelitarne w Polsce zaczął działać z pełną operatywnością (Bosy i in. 2007). Jednym z jego celów był aspekt naukowy – badanie ruchów skorupy ziemskiej na obszarze Polski. Wykorzystanie systemu w badaniach ruchów powierzchni terenu zostało opisane w wielu pracach zarówno w aspekcie geodynamiki obszaru całego kraju, jak i niektórych regionów (Bogusz i in. 2012; Kontny, Bogusz 2012, Bogusz, in. 2014, Klos i in. 2015).

Rejestrowane zmiany pozycji stacji (zmiany współrzędnych) charakteryzuje obciążenie, na które miało wpływ kilka źródeł (w tym: atmosfera, hydrologia itp.). W analizowanym przypadku, zgodnie z ogólnymi standardami systemu, dokładność dobowych rozwiązań położenia stacji wynosi około 2 mm dla każdej współrzędnej (Figurski i in. 2010). Wartość ta jest jednak w rzeczywistości oszacowana ze średniej, a dokładność dla każdej stacji może się różnić. W przypadku analizy dużej liczby danych np. dla okresu kilku lat, wyznaczenie prawidłowości (trendu) w zmianach pozycji danej stacji daje większą wiarygodność.

Współrzędne  $(X, Y, Z)$  wyrażone w europejskim przestrzennym układzie odniesienia ETRF2000 (geocentryczny układ współrzędnych ze środkiem znajdującym się w środku Ziemi) zostały przetransformowane w ramach przedstawionej pracy do układu topocentrycznego (układ współrzędnych ze środkiem znajdującym się w miejscu obserwacji). Dzięki transformacji uzyskano pozycje stacji wyrażone poprzez współrzędne  $(N, E, Up)$ , co umożliwia analizę w układzie lokalnym zarówno przemieszczeń (w tym zmian wysokości a nie współrzędnej  $Z$ , skierowanej wzdłuż osi obrotu Ziemi na biegun północny), jak i ich azymutów.

Na obszarze GZW poza stacją KATO zlokalizowane są stacje sieci ASG-EUPOS w Wodzisławiu (WOD1) i w Tarnowskich Górach (TAR1). Pomiary na tej ostatniej rozpoczęto w 2013 r. W bliskim sąsiedztwie granic GZW

funkcjonują stacje we Frydku Mistku (Czechy), w Krakowie i w Żywcu. Z wyżej wymienionych tylko wyniki na stacjach KATO i WOD1 mogą być obarczone efektami eksploatacji górniczej.

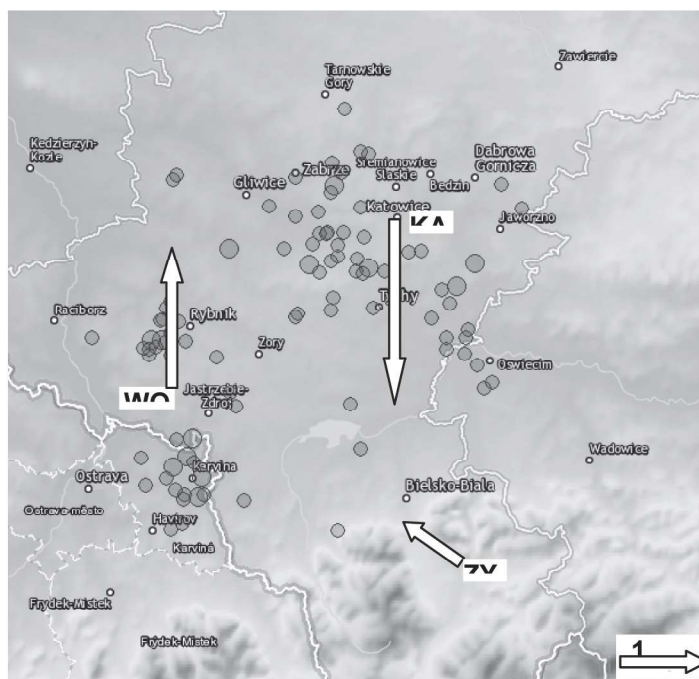
Na rys. 1 przedstawiono lokalizację wstrząsów sejsmicznych na obszarze GZW o magnitudzie powyżej 2,9 w okresie 06.2008-02.2014. Dane te zostały pozyskane z Europejskiego Centrum Seismologicznego (European-Mediterranean Seismological Centre - EMSC). W tym okresie zarejestrowano ok. 70 takich zdarzeń, z czego 11 miały miejsce w rejonie stacji KATO (w odległości do ok. 20 km). Ponadto na rys. 1 przedstawiono wektory przemieszczeń poziomych stacji WOD1, ZYWI i KATO. Orientacja przemieszczeń tych stacji zorientowana jest w kierunku centralnej osi niecki górnośląskiej.

Na rys. 2 przedstawione zostały czasowe rozkłady zmian dobowych wartości współrzędnych (N,E,Up) stacji KATO. Na ich rozkładach widoczny jest dla wszystkich współrzędnych silnie zaznaczający się trend oraz zmiany sezonowe. Charakterystyczny jest silny związek pomiędzy rozkładami wartości składowych Up i N, szczególnie widoczny po roku 2009. W obu przypadkach zaznacza się trend. Przemieszczenia pionowe są osiadaniem,

które podobnie jak składowa N przemieszczeń poziomych wykazują średnioroczne tempo ok. 2 mm/r. Rozkład składowej wysokości (Up) charakteryzuje się wyraźnie większą zmiennością, co wynika z faktu, że wyznaczana jest ona z mniejszą dokładnością. Jest to specyfika techniki GNSS. Dla potrzeb analizy sezonowości usunięty został trend zmian analizowanych składowych (N,E,Up).

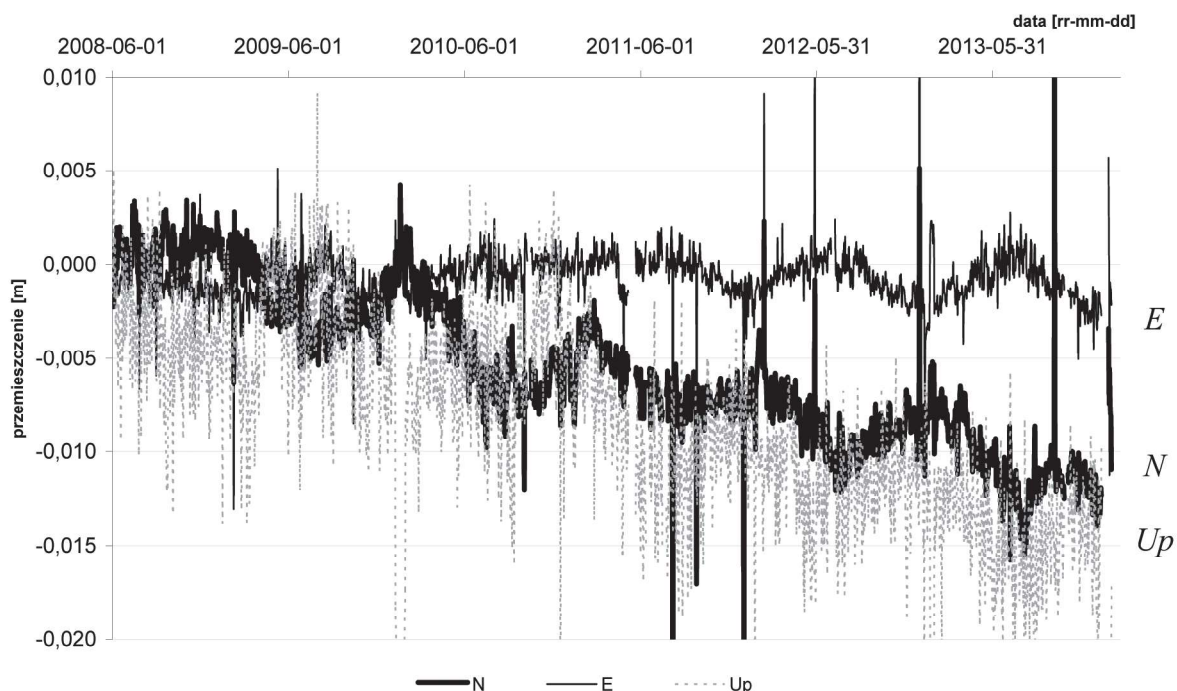
Stąd na kolejnych rysunkach przedstawiono zmiany tych składowych dla stacji KATO, gdzie sezonowość zaznacza się szczególnie w obserwacjach pozycji tej stacji. Rozkłady zostały przybliżone prostą funkcją okresową:

$$y = A \sin\left(\pi \frac{x - x_c}{W}\right)$$



Rys. 1. Lokalizacja wysokoenergetycznych wstrząsów w okresie 06.2008-02.2014 względem stacji KATO, WOD1 i ZYWI

Fig. 1. Localisation of high Energy tremors between 06.2008-02.2014 on the background of KATO, WOD1 and ZYWI stations

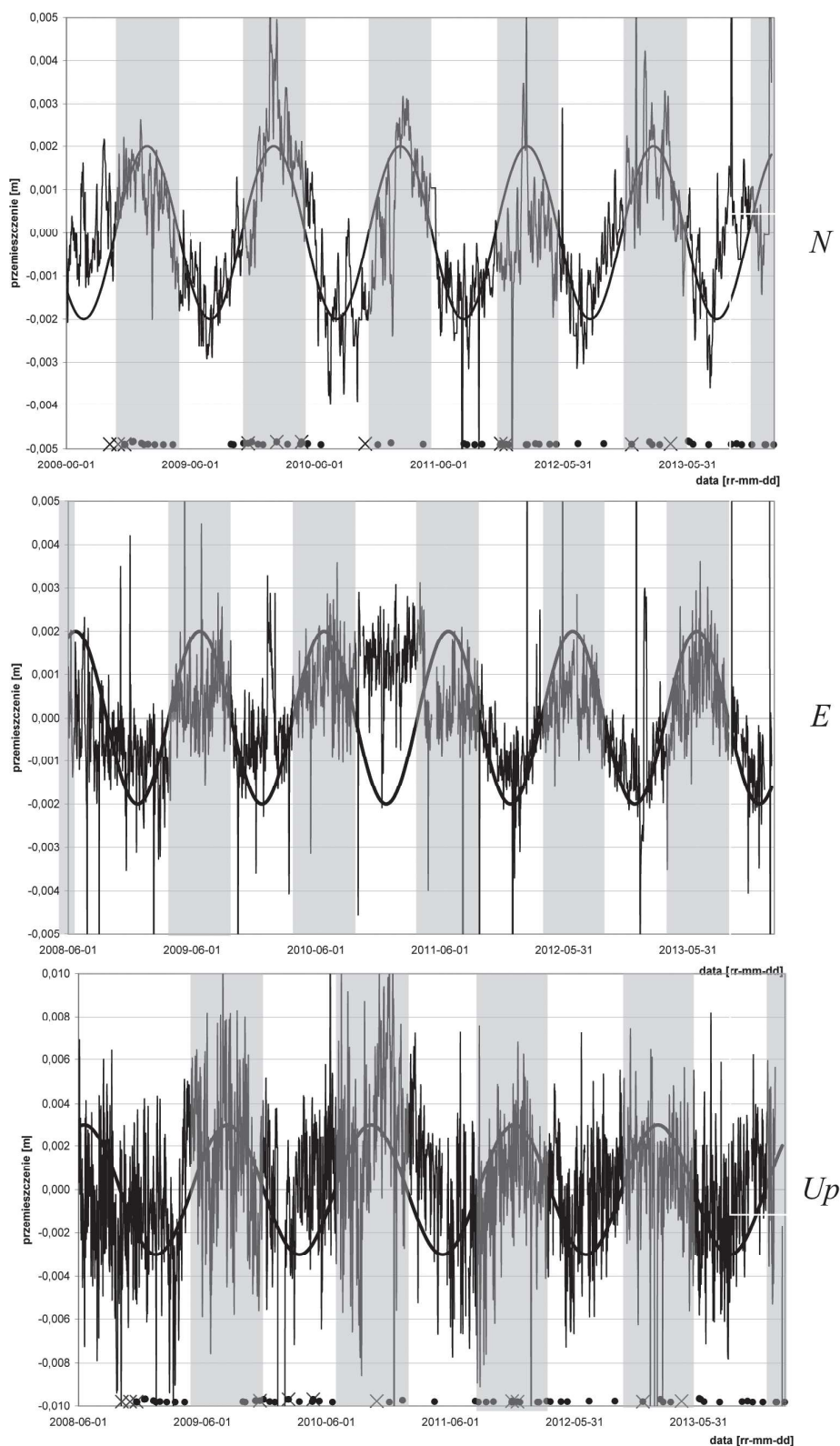


Rys. 2. Stacja KATO. Zmiany współrzędnych N,E,Up zarejestrowanych w okresie 06.2008-02.2014

Fig. 2. KATO station. Changes of N,E,Up coordinates observed between 06.2008-02.2014

Na podstawie symulacji określone zostały parametry: amplituda ( $A$ ), przesunięcie fazowe ( $x_c$ ) oraz okres ( $w$ ) dla poszczególnych rozkładów składowych  $N, E, Up$ . Co prawda obserwowane rozkłady można traktować jako sygnał, któ-

rego dekompozycja może być wykonana na komponenty sinusoidalne o różnej częstotliwości. Wyniki modelowania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Stacja KATO. Sezonowe zmiany współrzędnych:  $N$  (górny rysunek),  $E$  (środkowy rysunek) i  $Up$  (dolny rysunek) po usunięciu trendu wraz z odpowiednimi rozkładami aproksymujących je funkcji okresowych oraz momentami analizowanych wstrząsów sejsmicznych zarejestrowanych w sąsiedztwie KATO (gwiazdki) oraz całego obszaru GZW (kropki)

Fig. 3. KATO station. Seasonal variation of coordinates:  $N$  (upper picture),  $E$  (middle picture) and  $Up$  (lower picture) after removal of trend together with corresponding distributions of approximating periodic functions and moments of analyzed seismic tremors observed in the vicinity of KATO station (stars) and in whole area of the USCW



Podstawowym i najbardziej zaznaczającym się komponentem jest składowa roczna. Najlepsze rezultaty dopasowania funkcji do rozkładu uzyskano dla składowej  $N$  ( $r^2 = 0,4$ ). Sezonowość rozkładów współrzędnych przejawia się w przypadku stacji KATO ruchem w kierunku na północ w przypadku składowej  $N$  w miesiącach zimowych i na południe w miesiącach letnich (przy ogólnej tendencji w kierunku na południe). W przypadku składowej  $E$  zmiany są podobne (amplituda ok. 2 mm) i przejawiają się zmianą kierunku przemieszczenia na zachód w miesiącach zimowych i na wschód w miesiącach letnich. Również wartość amplitudy zmian sezonowych dla składowej  $Up$  wynosi ok. 2 mm. Charakterystyczne jest występowanie przemieszczeń pionowych ujemnych w miesiącach wiosennych i letnich oraz wypiętrzeń w pozostałych miesiącach. W przypadku rozkładów współrzędnych  $N$  i  $E$  wyznaczone wartości okresu  $w$  są podobne i wynoszą ok. 365 dni. W przypadku współrzędnej  $Up$ , która wykazuje większe odstępstwa od modelu okres ten wynosi ok. 420 dni, co może być efektem wpływów górniczych. W przypadku współrzędnych  $N$  i  $E$  przesunięcie w wartościach  $x_c$  (przesunięcie fazowe) wynosi około 1 miesiąca.

Omówioną charakterystykę rejestrowanych zmian sezonowych zestawiono z danymi o wstrząsach sejsmicznych o energii  $\geq 10^7$ , jakie wystąpiły na obszarze GZW w okresie 2008-2014. Związki te są widoczne w przypadku współrzędnej  $N$ , którą charakteryzuje zmienność jesienno-zimowa (dodatnie wartości zmian sezonowych), jak i wiosenno-letnia (zmiany ujemne). Niemal wszystkie zdarzenia (9 z 11) z rejonu stacji KATO (w odległości do 20 km) o magnitudzie większej niż 3 miały miejsce właśnie w okresie narastania dodatnich wartości sezonowych dla tej współrzędnej. Przy czym 80 proc. takich zdarzeń, które zarejestrowano na całym obszarze GZW miało miejsce w okresie, gdy na stacji KATO obserwowane były dodatnie wartości sezonowe  $N$ .

Zestawienie modelowych rozkładów sezonowych wszystkich współrzędnych przedstawione zostało na rys. 3.

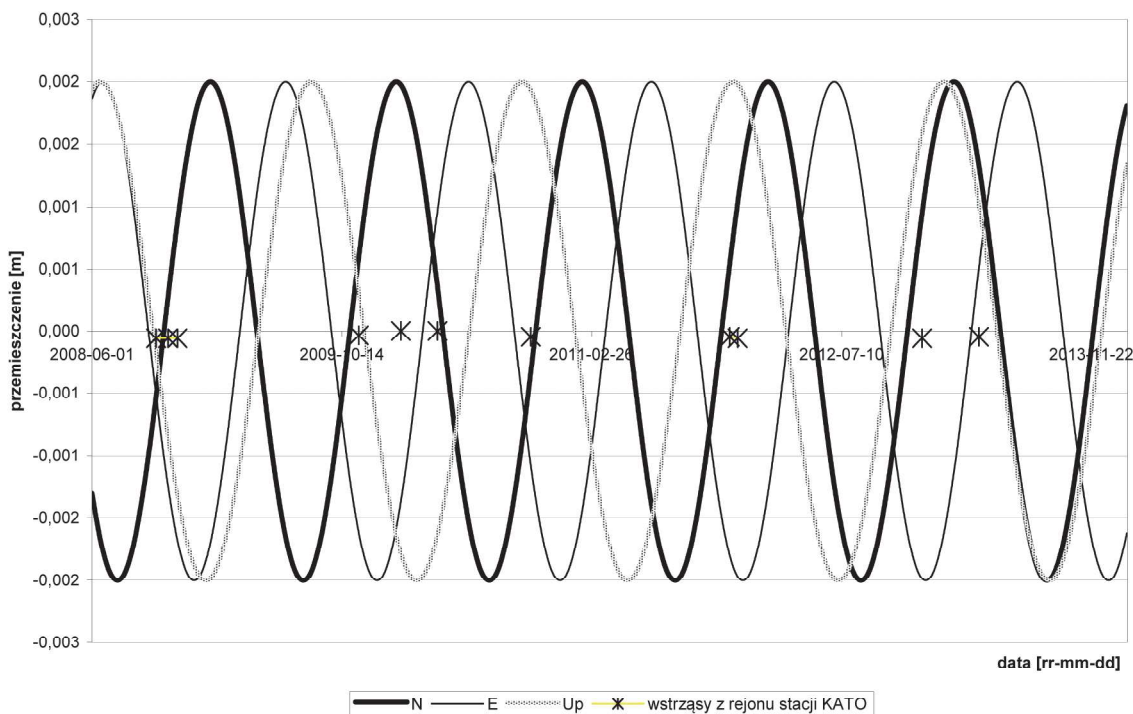
Uwidaczniają się wymienione charakterystyki oraz brak widocznej zależności pomiędzy rozkładami dla współrzędnych  $E$  i  $Up$  i momentami wystąpienia analizowanych wstrząsów, dodatkowo naniesionych na wykresie (rys. 4). Inaczej jest w przypadku współrzędnej  $N$ , gdzie niemal wszystkie zdarzenia sejsmiczne miały miejsce, gdy wartości zmian sezonowych były dodatnie. Zdecydowana większość z nich wystąpiła w stosunkowo wąskim oknie czasowym przechodzenia z wartości ujemnych w dodatnie. Ponieważ prawidłowości te dotyczyły kilku lat, to trudno je uznać za przypadkowe. Przedstawione badania należy traktować jako inicjujące, a wszelkie modele oparte na wspomnianych prawidłowościach wymagają szczegółowych analiz uwzględniających lokalną specyfikę stacji, w tym wpływy prowadzonej w rejonie Katowic eksploatacji górniczej.

#### 4. Podsumowanie

Technika GNSS znajduje szerokie zastosowania w określaniu powierzchni terenu, także osiadań lub przemieszczeń poziomych wzdłuż zakładanych linii obserwacyjnych. Brakuje jednak ciągłych pomiarów deformacji powierzchni dla dużej powierzchni, co umożliwiłoby prowadzenie nowej jakości badań, także w zakresie problematyki aktywności sejsmicznej obszaru GZW.

Na takie możliwości mogą wskazywać przedstawione wyniki badań, których celem było powiązanie momentu wystąpienia wstrząsów sejsmicznych z sezonowymi zmianami współrzędnych stacji KATO.

Na obszarze GZW wyróżnia się sejsmiczność górniczą i górniczo-tektoniczną, z czego wynika, że uwarunkowania tektoniczne odgrywają kluczową rolę w analizach sejsmicznej aktywności GZW. Podobnie jak w przypadku innych obszarów (np. Kalifornii), sezonowe zmiany hydrologiczne mogą wpływać na charakterystykę deformacji powierzchni terenu,



Rys. 4. Rozkłady funkcji okresowych modelujących rozkłady zmian współrzędnych  $N$ ,  $E$ ,  $Up$  oraz momenty zdarzeń sejsmicznych z rejonu stacji KATO

Fig. 4. Distribution of periodic function modeling changes of  $N$ ,  $E$ ,  $Up$  coordinates together with moments of seismic events of KATO station area

jak również na naprężenia w rejonach aktywnych uskoku. W celu przedstawienia ewentualnych związków charakterystyki okresowych zmian pozycji stacji KATO permanentnej sieci GNSS systemu ASG-EUPOS obszaru GZW oraz momentami występowania wstrząsów uwalniających wysoką energię sprężystości przeanalizowano zestawienie danych geodezyjnych i sejsmicznych. Jak wykazano, istnieje związek czasowy pomiędzy sezonowymi zmianami współrzędnych  $N$  stacji KATO a wysokoenergetycznymi zdarzeniami sejsmicznymi. Czasowa zbieżność dotyczy przede wszystkim wstrząsów, których lokalizacja była oddalona nie więcej niż ok. 20 km od stacji. Ponadto analizowane zdarzenia sejsmiczne miały miejsce w okresie jesienno-zimowym, gdy sezonowe zmiany tej współrzędnej wykazywały wartości dodatnie. Przyjmując, że obserwowane zmiany odzwierciedlają fizyczny ruch stacji, to przemieszczenia te miałyby orientację w kierunku północnym. Można przyjąć, że odzwierciedlają one zmiany w charakterystyce naprężeń, które mogłyby mieć wpływ na skłonność górotworu do wyzwiania większych energii w czasie wstrząsów indukowaną eksploatacją górnictwa.

Poszukiwanie coraz to nowych rozwiązań w ocenie deformacji górotworu i powierzchni terenu, w tym zastosowanie permanentnych danych GNSS jest podstawą do szczegółowej charakterystyki powstawania zjawisk i procesów zachodzących w górotworze, w tym wielkopowierzchniowych ruchów oraz zagrożeń z nimi związanych.

#### Podziękowania

*Autor składa podziękowania Dyrekcji ASG-EUPOS za udostępnienie danych wykorzystanych w badaniach. Praca wykonana w ramach badań statutowych Akademii Górniczo-Hutniczej nr 11.11.150.195*

#### Literatura

- BOSY J., GRASZKA W., LEONCZYK M. 2007 - ASG-EUPOS - a multifunctional precise satellite positioning system in Poland. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 1(4). Ss. 371–374.
- BOGUSZ J., FIGURSKI M., KONTNY B.I., GRZEMPOWSKI P. 2012 - Horizontal velocity field derived from EPN and ASGEUPOS satellite data on the example of south-western part of Poland. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. Vol. 9. Ss. 349-357.
- BOGUSZ J., KŁOSA., GRZEMPOWSKI P.I., KONTNY B. 2014 - Modelling the velocity field in a regular grid in the area of Poland on the basis of the velocities of European permanent stations. *Pure and Applied Geophysics*, 2014. Vol. 171(6). Ss. 809-833. doi:10.1007/s00024-013-0645-2.
- CHRISTIANSEN L., HURWITZ S., INGEBRITSEN S. E. 2007 - Annual modulation of seismicity along the San Andreas Fault near Parkfield, CA. *Geophysical Research Letters*. T. 34, L04306. https://doi.org/10.1029/2006GL028634.
- CRAIG T.J., CHANARD K., CALAIS E. 2017 - Hydrologically-driven crustal stresses and seismicity in the New Madrid seismic zone. *Nature Communications*. 8(1), 2143. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01696-w.
- CROWELL B. W., BOCK Y., MELGAR D. 2012 - Real-time inversion of GPS data for finite fault modeling and rapid hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, 2012. T. 39 (9): L09305. doi:10.1029/2012GL051318.
- DUBIŃSKI J., STEC K. 2000 - Modalność sejsmiczności górnictwa w świetle badań mechanizmów ognisk wstrząsów górnictwa. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. S.C., M-19 (281)*, 2000. Ss. 57-71.
- DUTILLEUL P., JOHNSON C.W., BÜRGMANN R., WAN Y., SHEN Z.K. 2015 - Multifrequency periodogram analysis of earthquake occurrence: An alternative approach to the Schuster spectrum, with two examples in central California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. T. 120. Ss. 8494–8515. https://doi.org/10.1002/2015JB012467.
- FEIGL, K.L. 2002 - Estimating earthquake source parameters from geodetic measurements. W: Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P. C., i Kisslinger C., *Wyd. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Elsevier, Amsterdam. Vol. 81A. Ss. 607–620.
- FIGURSKI M., SZAFRANEK K., BOGUSZ J., KAMINSKI P. 2010 - Investigation on stability of mountainous EUPOS sites' coordinates. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. Vol. 7 (3). Ss. 263-274.
- GAO S.S., SILVER P.G., LINDE A.T., SACKS I. S. 2000 - Annual modulation of triggered seismicity following the 1992 Landers earthquake in California. *Nature*. T. 406(6795), 500–504. https://doi.org/10.1038/35020045.
- GIBOWICZ S.J., KIJKO A. 1994 - An introduction to mining seismology. *Int. Geoph. San Diego-New York*, Academic Press.
- IDZIAK F.A., TEPER L., ZUBEREK M.W. 1999 - Sejsmiczność a tektonika Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Wyd. UŚ, Katowice*.
- JURA D. 1999 - Young Alpine Kłodnica Fault scarps of the metacarthian in the Silesian Upland. *Tech. Posz. Geol. Geosynoptyka i Geoterma* 1, Kraków, 52-56.
- GOSZCZ A. 2003 - Kilka uwag o zagrożeniu sejsmicznym (artykuł dyskusyjny). *WUG „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie”* nr 5, s. 21-22.
- KIJKO A. 1986 - Bimodalny charakter ekstremalnych rozkładów zjawisk sejsmicznych w kopalniach. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-8 (191)*. Ss. 91-101.
- KIJKO A., DRZEŻLA B. 1986 - Bimodalny charakter ekstremalnych rozkładów zjawisk sejsmicznych w kopalniach. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-8 (191)*. Ss. 91-101.
- KIJKO A., DRZEŻLA B., MENDECKI A. 1985 - Dlaczego rozkłady ekstremalnych zjawisk sejsmicznych w kopalniach mają charakter bimodalny. *Acta Montana*. A971, s. 225-244.
- KŁOSA., BOGUSZ J., FIGURSKI M., KOSEK W.W. 2015 - Irregular variations in GPS time series by probability and noise analysis. *Survey review*. Vol. 47(342). Ss. 163–173. doi:10.1179/1752270614Y.0000000133.
- KNOPIK M., ZUBEREK W., WOJTECKI Ł. 2015 - Wieloprzyczynowość wysokoenergetycznych wstrząsów górnictwa. *„Przeгляд Górnictwa”* nr 12, s. 12-19.
- KONTNY B., BOGUSZ J. 2012 - Models of vertical movements of the Earth crust surface in the area of Poland derived from leveling and GNSS data. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. Vol. 9(3). Ss. 331-337.
- MAJCHERCZYK T., NIEDEBALSKI Z. 2017 - The impact of multiple seam mining exploitations on seismic activity and state of stress. *Studia Geotechnica et Mechanica*. T. 39 (1). Ss. 53-62. doi:10.1515/sgem-2017-0005.
- MATSUMURA K. 1986 - On regional characteristics of seasonal variation of shallow earthquake activities in the world. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*. T. 36 (2). Ss. 43–98.
- MELGAR D., BOCK Y. I CROWELL B. W. 2012 - Real-time centroid moment tensor determination for large earthquakes from local and regional displacement records. *Geophysical Journal International*, 2012. T. 188 (2). Ss:703-718, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05297.x.
- PILECKA E. 2015 - Rola tektoniki w oddziaływaniu na powierzchnię wysokoenergetycznej sejsmiczności w GZW. *„Przeгляд Górnictwa”* nr 2, s. 43-48.
- POPIOLEK E., OSTROWSKI J., CZAJA J., MAZUR J. 2001 - The impact of a strong mining tremor on the subsidence of the area surface in the Legnica-Głogów Copper Area. In *The 10<sup>th</sup> FIG International Symposium on Deformation Measurements*, Orange, California USA. Ss. 77-80.
- SOKOŁA-SZEWIOLA V. 2011 - Przebieg zaobserwowanych przemieszczeń pionowych terenu górnictwa w czasookresie związanym z wystąpieniem wstrząsu indukowanego eksploatacją ścianową. *„Górnictwo i geologia”*. T. 6, z. 3, s. 157-168.
- STEC K. 2002 - Aktywność sejsmiczna Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Górnictwo i Środowisko. Prace Naukowe GIG*, nr 3, s. 43-58.
- STEC K., PATYŃSKA R., KONOPKO W. 2011 - Próba zweryfikowania

zapisów względnej aktywności górotworu generowanej robotami górniczymi w GZW w latach 1988-1998, Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Zagrożenia Naturalne” nr 4/2, s. 451-454.

STEC K., MUTKE G. 2016 - Mechanizm ognisk i intensywność oddziaływania na środowisko powierzchniowe wstrząsów regionalnych z obszaru Katowice-Panewniki. „Wiadomości Górnicze” nr 1, s. 11-20.

SZCZERBOWSKI Z. 2019 - High-energy seismic events in Legnica-Głogów Copper District in light of ASG-EUPOS data. Reports on Geodesy and Geoinformatics. Vol.107, Issue 8-11, Ss. 25-40.

SZCZERBOWSKI Z., JURA J. 2015 - Mining induced seismic events and surface deformations monitored by GPS permanent stations. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 12 (3). Ss. 237-248, doi:10.13168/AGG.2015.0023.

WANIOR J. 1983 - Metoda prognozowania wstrząsów lub tąpnięć w oparciu

o wyniki pomiarów geodezyjnych na przykładzie eksploatacji górniczej prowadzonej w filarze ochronnym dla miasta Bytomia. Praca doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie. Materiały niepublikowane, Biblioteka Główna AGH, zbiory specjalne.

ZEMBATY Z. 2004 - Rockburst induced ground motion – a comparative study. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. No 24. Ss. 11-23.

ZUBEREK W.M., TEPER L., IDZIAK A.F., SAGAN G. 1996 - Tectonophysical approach to the description of mining induced seismicity in the Upper Silesia. W: A. Idziak (red.): Tectonophysics in Mining Areas. Ss. 79 – 98. Wyd. Uniw. Śl., Katowice.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj-czerwiec 2019

Artykuł akceptowano do druku – 29.11.2019

