



## Sejsmo-grawitacyjne sygnatyry wstrząsów górniczych w ciągłych zapisach siły ciężkości grawimetrów pływowych gPhoneX

### Seismo-gravity signatures of mining tremors in continuous recordings of gravity by tidal gravimeters gPhoneX

Dr inż. Łukasz Kortas<sup>\*)</sup>

**Treść:** W artykule przedstawiono wyniki obserwacji zmian pola grawitacji ziemskiej rejestrowanych w czasie występowania wstrząsów górotworu wywołanych podziemną eksploatacją węgla na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Zmiany pola grawitacji rejestrowane są w sposób ciągły przez dwa grawimetry pływowe gPhoneX zainstalowane w dwóch, różnych pod względem sejsmiczności górniczej rejonach Zagłębia. Jeden z grawimetrów zainstalowano w południowej części GZW, w rejonie kopalni ROW w Rybniku. Na tym obszarze odbywa się intensywna eksploatacja pokładów węgla na głębokości około 1 km. Ogniska wstrząsów powodowanych eksploatacją znajdują się w odległościach epicentralnych od 0 do 3 km od miejsca instalacji stacji grawimetrycznej, tj. w bliskim polu falowym zdarzeń sejsmicznych. Drugi grawimetr rejestruje zmiany siły ciężkości w północnej części GZW, na terenie pogórnym w Katowicach, gdzie eksploatacja została dawno zakończona. Zarejestrowane przez ten instrument antropogeniczne zdarzenia sejsmiczne pochodzą z odległości od kilku do kilkudziesięciu kilometrów - z obszaru odległych aktywnych kopalń węgla, a tym samym z pola dalekich zdarzeń sejsmicznych. Celem artykułu jest analiza zbioru danych sygnałów sejsmo-grawitacyjnych pochodzących od wstrząsów górniczych zarejestrowanych przez grawimetry w okresie blisko 14 miesięcy, od listopada 2018 r. do grudnia 2019 r. w aspekcie ich przydatności do badania ruchów górotworu wywołanych sejsmicznością towarzyszącą eksploatacji. Wykonywane za pomocą układu grawimetrów pływowych mogą istotnie wzbogacić informację sejsmologiczną uzyskiwaną z tradycyjnych górniczych sieci sejsmologicznych w przedziale bardzo niskich częstotliwości ruchów górotworu.

**Abstract:** The article presents the results of observations of changes in the Earth's gravity field recorded during the occurrence of rock mass shocks caused by underground coal mining in the Upper Silesian Coal Basin. Changes in the gravitational field are recorded continuously by two gPhoneX tidal gravimeters installed in two regions of the USCB, different in terms of mining seismicity. One of the gravimeters was installed in the southern part of the USCB, near the ROW mine in Rybnik. Intensive exploitation of coal seams takes place in this area at a depth of about 1 km. The foci of mining tremors are located at distances from 0 to 3 km from the place of installation of the gravimetric station, i.e. in the near field of seismic events. The second gravimeter records changes in gravity in the northern part of the USCB, in the post-mining area in Katowice, where exploitation has ended. The anthropogenic seismic events recorded by this instrument come from a distance of several to several dozen kilometers - from the area of distant active coal mines, and thus from the distant field of seismic events. The purpose of the article is to analyze the set of seismo-gravity signals coming from mining tremors recorded by gravimeters over a period of almost 14 months, from November 2018 to December 2019 in the aspect of their usefulness for the study of mining induced rock mass movements. Due to their distinctness, observations conducted by tidal gravimeters system can significantly enrich seismological information obtained from traditional mining seismological in a very low frequency range of rock mass motions.

#### Słowa kluczowe:

grawitacja, górnictwo, węgiel kamienny, sejsmiczność, wstrząsy

#### Key words:

gravity, seismicity, coal, mining, tremors

## 1. Wstęp

Podziemna eksploatacja węgla kamiennego systemem zawałowym w GZW powoduje wstrząsy górotworu (Wierzchowska 1981, Stec 2007). Ich intensywność zależy od czynników geologicznych i górniczych (Marcak, Mutke 2013, Dubiński i in. 2019). Główną przyczyną wstrząsów jest zaburzenie ukształtowanego procesami geologicznymi naturalnego rozkładu naprężeń w basenie sedymentacyjnym poprzez częściowe usunięcie warstw budujących jego strukturę (Dubiński i in. 2019). Czynnikiem kształtującym ten rozkład jest pole grawitacji ziemskiej. W przypadku podziemnej eks-

ploatacji kopalni pole to jest również czynnikiem powodującym wyrównywanie się pola naprężeń w warstwach skalnych w rejonie wyrobisk górniczych poprzez deformacje ich struktury oraz takie zjawiska dynamiczne jak wstrząsy. Przeobrażenia struktury górotworu powodują zmiany w rozkładzie lokalnego pola grawitacji w rejonach prowadzonej eksploatacji górniczej (Lyness 1985, Szczerbowski 2003, Kotyrba i in. 2005, Kotyrba 2014). Przekształcenia struktury górotworu powodują zmiany w rozkładzie lokalnego pola grawitacyjnego w obszarach eksploatacji górniczej (Fajkiewicz 1972a, 2007, Lyness 1985, Szczerbowski 2003, Kotyrba i in. 2005, Kotyrba 2014). Jedną z pierwszych prób prognozowania wstrząsów w kopalniach na podstawie czasowych badań grawitacyjnych przeprowadzał Fajkiewicz od

<sup>\*)</sup> Główny Instytut Górnictwa, Katowice

lat 70. (1977b, 1981b, c, 1983b, 1990b, 2007, Fajkiewicz i in. 1982, 1986a) na terenie różnych kopalń węgla w GZW. Badania te polegały na monitorowaniu zmian grawitacji przed wystąpieniem wstrząsów górniczych przy użyciu tradycyjnych grawimetrów lądowych (*land gravimeters*) do pomiarów względnych siły ciężkości przeprowadzanych na powierzchni i w podziemnych wyrobiskach kopalń. Naturalną wydaje się więc koncepcja zastosowania grawimetrów pływowych (*tidal gravimeters*) w badaniach takich zjawisk dynamicznych jak wstrząsy górnicze.

Grawimetry przeznaczone do obserwacji pływów skorupy ziemskiej są także wykorzystywane w badaniach wstrząsów tektonicznych (Niebauer i in. 2011) oraz innych zjawisk dynamicznych, zachodzących w skorupie ziemskiej na skutek procesów naturalnych i antropogenicznych (Battaglia i in. 2007, Sugihara i in. 2013). Grawimetry pływowe rejestrują stacjonarnie zmiany składowej pionowej pola grawitacji, zarówno krótkookresowe (drżania podłoża), jak i długookresowe (pływy skorupy ziemskiej). Ze względu na przedział częstotliwości próbowania sygnałów grawimetrycznych (0-2.5Hz) pozwalają one na badanie ruchu podłoża w zakresie bardzo małych częstotliwości, tj. mniejszych niż 1Hz. Taki przedział częstotliwości nie jest dostępny dla tradycyjnych sensorów drgań takich jak sejsmometry i akcelerometry tradycyjne (Niebauer i in. 2011). W artykule przedstawiono pierwsze wyniki zastosowania grawimetrów pływowych typu *gPhoneX* w badaniach wstrząsów generowanych podziemną eksploatacją węgla w GZW.

## 2. Sejsmiczność w warunkach geologiczno-górniczych GZW

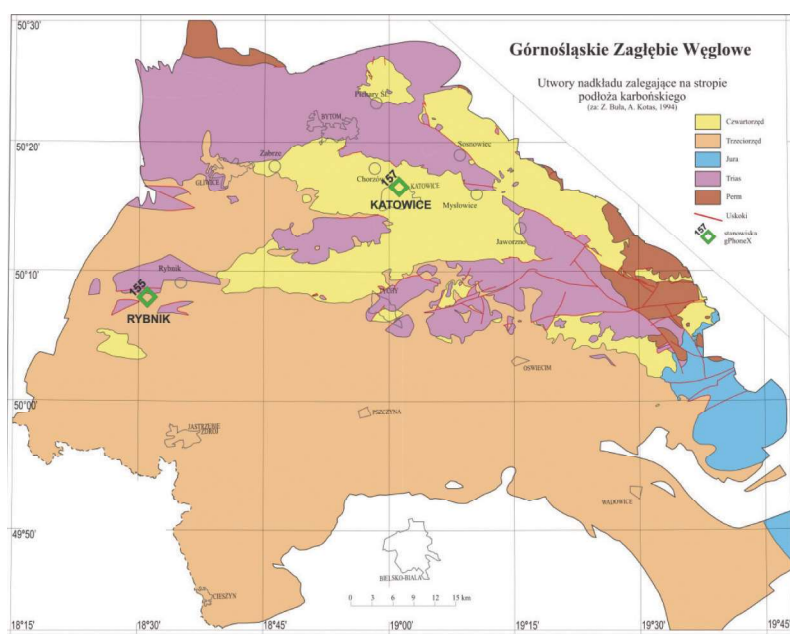
W strukturze geologicznej GZW udział biorą osady czwartorzędowe, trzeciorzędowe, jury, triasu, permu (nadkład) i karbonu. Warstwy nadkładu przykrywają utwory karbonu zawierające złoża węgla kamiennego. W południowej części GZW ich miąższość sięga ponad 2 km. Schematyczne rozmieszczenie

poszczególnych serii stratygraficznych na stropie karbonu pokazano na rys. 1 (Buła, Kotas 1994).

Osady czwartorzędowe o miąższości od 0 do 60 m mają genezę fluwioglacjalną i są reprezentowane przez piaski i gliny z lokalnymi wstawkami żwirowymi. Utwory trzeciorzędowe reprezentowane są przez serie skał ilastych (iły, iłolupki, mułki piaszczyste) pochodzenia morskiego. Miąższość tych osadów waha się od wartości zerowej w północnej i środkowej części zagłębia do kilkuset metrów w części południowej. Trias reprezentowany jest przez wapienie, margle i piaskowce wapienne, które przykrywają pokłady karbonu w północnej i zachodniej części GZW. W środkowej części Zagłębia utwory triasu występują w postaci płatów. Warstwy triasowe zalegają niemal poziomo na stropie warstw karbońskich i są lokalnie zuskokowane, jednak ich liczba jest znacznie mniejsza niż uskoków karbońskich. Osady jurajskie i permskie występują jedynie w północnej i wschodniej części zagłębia (rys. 1).

Utwory karbonu mają strukturę warstwową i zbudowane są z piaskowców, mułowców i iłowców. Pokłady węgla kamiennego występują jako wkładki w tych skałach w postaci regularnych warstw o miąższości od kilku centymetrów do 9 metrów. Warstwy karbonu zostały pofałdowane w wyniku ruchów tektonicznych w orogenezie waryscyjskiej i alpejskiej, które przyczyniły się do powstawania siodła (antykliny), drobnych zagłębień (synkliny) i wielu uskoków. Uskoki charakteryzują się zmienną amplitudą zrztutu, od kilku do kilkuset metrów. Dzielą one utwory karbonu na segmenty i niejako wymuszają konieczność stosowania określonych technik eksploatacji pokładów węgla. Średni upad warstw karbonu waha się od kilku do kilkunastu stopni. Tylko w zachodniej części basenu nachylenie warstw jest większe i dochodzi lokalnie do 50°.

Wydobycie węgla w GZW ma trzystuletnią historię. W ostatnich latach wiele kopalń, głównie w północnej części GZW, zostało zlikwidowanych. Kopalnie prowadzące nadal wydobywanie zlokalizowane są głównie w środkowej i południowej części GZW (rys. 2). Sejsmiczność w przeważającej liczbie działających kopalń jest wysoka ze względu na rosnącą



Rys. 1. Lokalizacja stanowisk *gPhoneX* na tle mapy geologicznej GZW (Buła, Kotas 1994)

Fig. 1. Location of *gPhoneX* stations on a geological map of the USCBA (Buła, Kotas 1994)

głębokość wydobycia, znacznie przekraczającą 500 m i nie rzadko dochodzącą do 1000 m. Z uwagi na wysoką aktywność sejsmiczną kopalnie posiadają zwykle własne systemy monitoringu sejsmicznego. Czujniki tych systemów umieszcza się w pobliżu prowadzonych prac wydobywczych w lokalizacjach naziemnych i podziemnych. Czułość systemów kopalnianych jest wystarczająco wysoka, aby wykryć zdarzenia sejsmiczne o lokalnej magnitudzie  $M = 1$  lub mniejszej.

W skali regionalnej sejsmiczność indukowana eksploatacją górnictw kontrolowana jest przez sieć stacji seismometrycznych Górnośląskiej Regionalnej Sieci Seismologicznej rozmieszczonych na terenie całego GZW. Dane o zdarzeniach sejsmicznych są przetwarzane i przechowywane w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach i dostępne publicznie poprzez portal internetowy: *grss.gig.eu* (Stec 2007). W analizowanym w tym artykule okresie, intensywność wstrząsów wywołanych eksploatacją wynosiła od  $M = 2,3$  do  $M = 3,8$ . W całym okresie funkcjonowania sieci GRSS najsilniejsze pod względem energii wstrząsy górnicze miały magnitudę lokalną o wartości  $M = 4,2$ .

### 3. System obserwacji zmian siły ciężkości

Do obserwacji zmian w polu grawitacji na terenach górniczych i pogórnicznych, jako sieć pomiarową zastosowano dwa grawimetry pływowe *gPhoneX* firmy Micro-g LaCoste (USA) o numerach seryjnych 155 i 157. Urządzenia te, zakupione przez Główny Instytut Górnictwa w ramach projektu European Plate Observing System, współfinansowanego przez UE EPOS-PL, są pierwszymi w Polsce grawimetrami tego typu. W ramach tego projektu grawimetry zostały zintegrowane z sieciami obserwacji seismologicznych GNSS oraz InSAR w ramach Global Geodetic Observing System (GGOS-PL++) (Sośnica i in. 2018).

Zadaniem systemu pomiarowego jest rejestracja zmian składowej pionowej przyspieszenia ziemskiego w czasie ( $g$ ) w jednostkach mikro Gal [ $\mu\text{Gal}$ ] ( $1\mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ), z zalecaną przez producenta systemu częstotliwością 5 Hz. Poprzez całkowanie krzywej zmian otrzymuje się wartości amplitudy

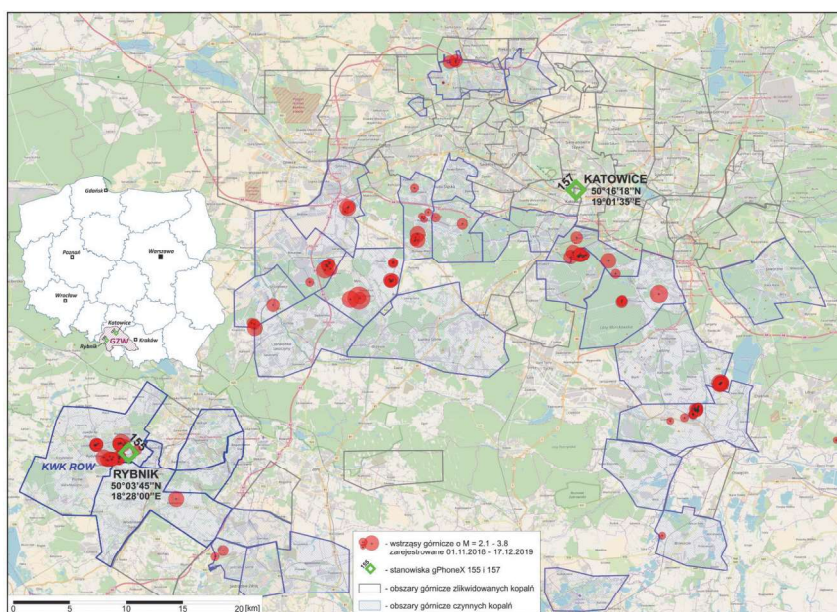
składowej pionowej prędkości drgań  $V$  oraz amplitudy składowej pionowej przemieszczenia podłoża  $P$ . Jednostkami prędkości są mikrony ( $10^{-6} \text{ m}$ ) na sekundę [ $\mu\text{s}$ ], a dla przemieszczenia pionowego mikrony [ $\mu$ ].

Grawimetr *gPhoneX* 155 umiejscowiony jest na betonowym postumencie o wymiarach 1100x1100 mm w piwnicy maszyny wyciągowej Szybu Głowacki Zabytkowej Kopalni Ignacy w Rybniku – Niewiadomiu ( $50^{\circ}03'45''\text{N}$ ,  $18^{\circ}28'00''\text{E}$ ). Postument na głębokość ok. 1,2 m od dna piwnicy i jest posadowiony bezpośrednio na piaskowcu karbońskim. Eksploatacja węgla jest prowadzona systemem ścianowym w odległości 0 – 2,5 km od stanowiska pomiarowego przez kopalnię ROW na głębokości około 1000 m w pokładach: 700, 703, 706, 713/12, 714 (warstwy jaklowieckie).

Drugi element sieci seismo-grawimetrycznej pracuje na analogicznym betonowym postumencie o wymiarach 1300x1300 mm zlokalizowanym w Górnośląskim Obserwatorium Geofizycznym (GOG) wchodzącym w skład kompleksu budynków Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach ( $50^{\circ}16'18''\text{N}$ ,  $19^{\circ}01'35''\text{E}$ ). GOG jest elementem Górnośląskiego Systemu Obserwacji Geofizycznych utworzonym w ramach projektu EPOS-PL (Mutke i in. 2019). Postument o głębokości ok. 1,5 m poniżej posadzki piwnicy, osadzony jest również na piaskowcu karbońskim. Zadaniem grawimetru 157 jest rejestracja zmian  $g$ , i parametrów pochodnych  $V$  i  $P$  na terenie gdzie eksploatacja złoża surowców mineralnych została zakończona, a kopalnie zostały zlikwidowane.

Wzajemna odległość grawimetrów to 46,16 km, a azymut linii łączącej stanowiska wynosi  $59,53^{\circ}$ . Położenie stacji 155 i 157 na tle mapy sytuacyjnej obrazującej rozkład czynnych i zlikwidowanych kopalni w obrębie GZW przedstawiono na rys. 2.

Na pojedyncze stanowisko pomiarowe *gPhoneX* składają się trzy główne elementy: układ pomiarowy z czujnikiem zmian grawitacji umieszczony na platformie ODIN służącej do automatycznego poziomowania układu pomiarowego (Micro-g LaCoste 2016), moduł elektroniczny zawierający zegar rubidowy rejestrujący uniwersalny czas koordynowany (UTC) za pośrednictwem anteny GPS oraz system podtrzymywania zasilania UPS i komputer typu laptop do



Rys. 2. Lokalizacja stanowisk grawimetrycznych *gPhoneX* oraz analizowanych wstrząsów na tle aktywnych i zlikwidowanych OG w GZW

Fig. 2. Location of *gPhoneX* stations and studied tremors on the background of operating and abandoned coal mines in the USCB

akwizycji danych poprzez program *gMonitor*. Producent systemu określa rozdzielczość pracy aparatury *gPhoneX* na  $0,1 \mu\text{Gal}$ , dokładność na  $1 \mu\text{Gal}$ , a całkowity szum systemu na maksymalnie  $0,45 \text{ mGal}/\text{Hz}^{1/2}$ . Dryft urządzenia nie powinien przekraczać  $1,5 \text{ mGal}/\text{miesiąc}$  i zwykle wynosi  $<500 \mu\text{Gal}/\text{m-c}$ . Grawimetry 155 i 157 znajdują się obecnie w fazie stabilizacji dryftu, która trwa około 2 lat (*Micro-g LaCoste 2013b*). Niemniej jednak widoczna jest już obecnie jego stabilizacja.

#### 4. Sygnatury sejsmo-grawitacyjne w domenie czasu

Przykładem sejsmiczności w GZW i odmiennego niż standardowy sposobu jej rejestracji są wyniki 14-miesięcznej obserwacji zdarzeń rejestrowanych przez grawimetry pływowe. Od 01.11.2018 do 17.12.2019 dwa grawimetry *gPhoneX* rejestrowały zdarzenia sejsmiczne różnego pochodzenia. Znaczna część z nich miała genezę w dalekich, naturalnych wstrząsach tektonicznych i została wymieniona w biuletynie European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC) (*Godey i in. 2006*). Oba grawimetry praktycznie rejestrują drgania od każdego wstrząsu na kuli ziemskiej, którego intensywność jest większa od  $M=5$ . Maksymalna wartość zmiany  $g$  dla takiego zdarzenia jest rzędu tysiąca do kilku tysięcy  $\mu\text{Gal}$ , a czas trwania sygnału jest długi, rzędu dziesiątek minut do nawet 2 godzin. Odmienną charakterystykę mają zapisy sygnałów pochodzących od wstrząsów górniczych. Mają one postać bardzo krótkotrwałych pików, od 1 do kilku sekund, o znacznej amplitudzie osiągającej kilkadziesiąt tysięcy  $\mu\text{Gal}$ .

Przykładowe zapisy takich zdarzeń przedstawiono na rys. 3: a) pole dalekie i b) pole bliskie. W pierwszym z przypadków maksymalna amplituda zmiany  $g$  wynosiła  $71\,134 \mu\text{Gal}$ , natomiast w drugim  $24\,535 \mu\text{Gal}$ . Są to wartości znacznie mniejsze aniżeli rejestrowane przez sensory akcelerometryczne w wyższych pasmach częstotliwości (*Mutke, Dubiński 2016*). Czas trwania obu sygnałów jest bardzo krótki i nie przekracza 10 sekund.

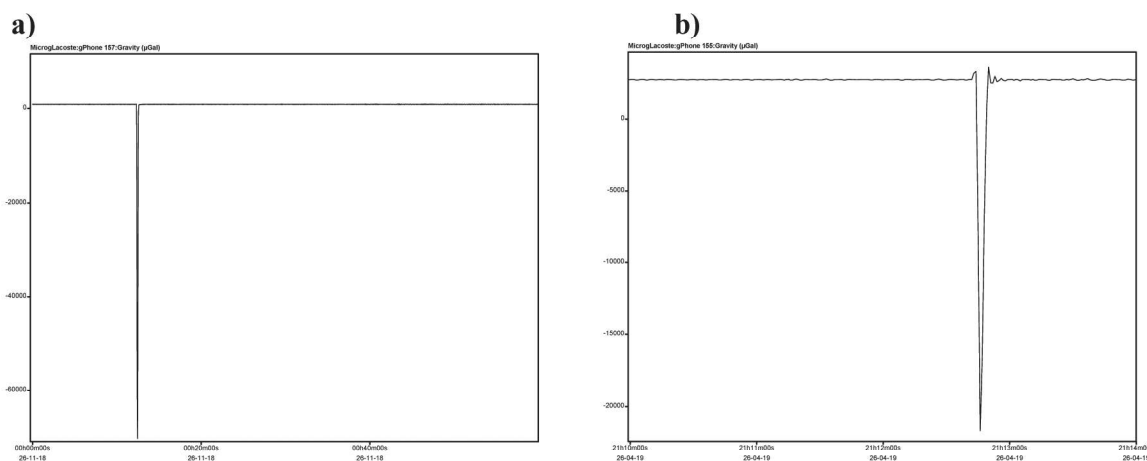
W analizowanym zbiorze danych jeden z najsilniejszych pod względem energetycznym wstrząsów wystąpił na terenie

kopalni Budryk w odległości epicentralnej ok. 26 km od stanowiska *gPhoneX* w Rybniku (08.11.2018, g:19:23:37 UTC). Jego magnitudę oszacowano na  $M=3,8$ . Był to wstrząs nietypowy, gdyż nie wywołał żadnych skutków w wyrobiskach podziemnych zlokalizowanych na głębokości ok. 1 km w jego strefie epicentralnej, a jednocześnie był odczuwalny na dużym obszarze. Według biuletynu European-Mediterranean Seismological Centre ([www.emsc-csem.org](http://www.emsc-csem.org)) ognisko wstrząsu znajdowało się na głębokości 4 km. Na tej głębokości kompleks skał osadowych basenu górnośląskiego kontaktuje się z kompleksem skał krystalicznych kambru. Skały te mają pochodzenie intruzyjne i są źródłem anomalnego strumienia ciepła (*Karwasiecka 1996, Kotyrba, Michalak 1987*), który przeobraził termicznie węgiel w niektórych regionach GZW. Zaraz po głównym wstrząsie wystąpiło kilka znacznie słabszych wstrząsów, co wydłużyło czas trwania całego zdarzenia do ok. 2 minut (rys. 4 a i b).

Najprawdopodobniej genezy wstrząsu należy upatrywać w zmianach pola naprężeń w warstwach skalnych zalegających poniżej poziomu eksploatacji górniczej (tąpnięcie spągowe), któremu towarzyszyły znacznie słabsze wstrząsy w warstwach zalegających powyżej poziomu eksploatacji.

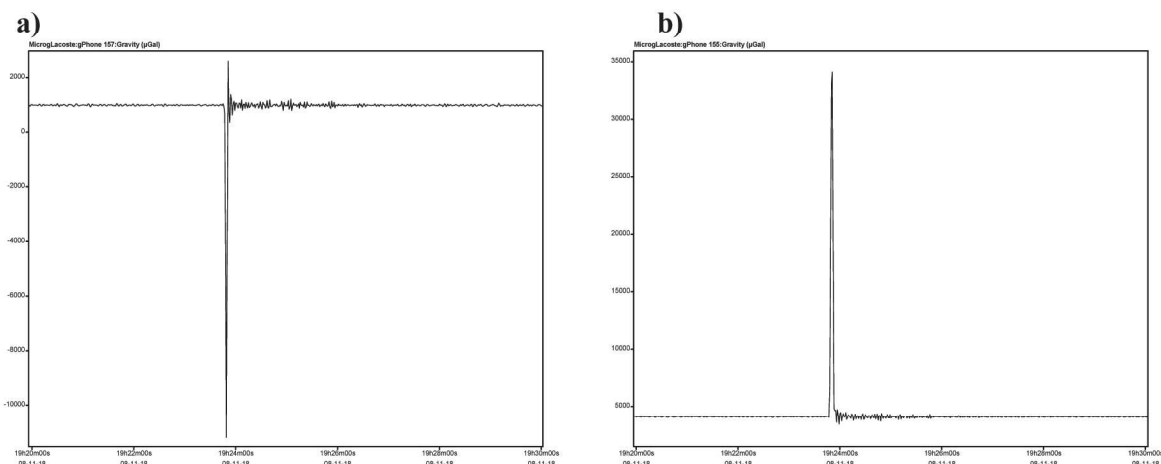
#### 5. Zależności pomiędzy intensywnością odpowiedzi sejsmo-grawitacyjnej na wstrząs a odległością od epicentrum

Do analizy efektów pochodzących od wstrząsów górniczych wykorzystano dane z ciągłego zapisu szeregu czasowego zmian  $g$ ,  $V$  i  $P$  z obu grawimetrów pływowych próbkowanych z częstotliwością 1 Hz, gromadzonych w dobowych zbiorach danych w formacie TSF (*Micro-g LaCoste 2013b*). Skokowe zmiany wspomnianych wielkości zidentyfikowane jako pochodzące od wstrząsów indukowanych pracami górniczymi skatalogowano w bazie danych o zaobserwowanych zjawiskach sejsmo-grawitacyjnych, zapisując maksymalne zmiany  $g$  [ $\mu\text{Gal}$ ],  $V$  [ $\mu/\text{s}$ ],  $P$  [ $\mu$ ], które dalej będą oznaczane odpowiednio:  $\Delta g^{\text{max}}$ ,  $\Delta V^{\text{max}}$ ,  $\Delta P^{\text{max}}$ .



**Rys. 3. Godzinny zapis zmian grawitacji:** a) *gPhoneX* 157 z wstrząsem górniczym o magnitudzie lokalnej  $M=3,1$  z 26.11.2018 (g. 00:12:17 UTC), miejsce zdarzenia: KWK “Staszic”, odległość epicentralna 6,2 km; b) *gPhoneX* 157 z wstrząsem górniczym o magnitudzie lokalnej  $M=3,2$  z 26.04.2019 (g. 21:12:41 UTC). Miejsce zdarzenia: KWK ROW, odległość epicentralna 2,3 km

**Fig. 3. Hourly record of changes in gravity:** a) *gPhoneX* 157 with mining tremor of local magnitude  $M=3.1$  from 26.11.2018 (h. 00:12:17 UTC), event location: “Staszic” Mine, foci distance 6.2 km; b) *gPhoneX* 155 with mining shock of local magnitude  $M=3.2$  from 26.04.2019 (g. 21:12:41 UTC), event location: ROW Mine, foci distance 2.3 km



**Rys. 4.** 10-minutowy zapis odpowiedzi grawitacyjnej na wstrząs w obszarze kopalni Budryk o magnitudzie  $M = 3,8$  z 08.11.2018 (g. 19:23:37 UTC): a) zapis z gPhoneX 157, odległość epicentralna 24,61 km; b) zapis z gPhoneX 155, odległość epicentralna 21,63 km

**Fig. 4.** A 10-minute recording of the gravitational response to a tremor in the area of the Budryk Mine of local magnitude  $M = 3.8$  from 08.11.2018 (19:23:37 UTC): a) recording from gPhoneX 157, foci distance 24.61 km; b) recording from gPhoneX 155, foci distance 21.63 km

Identyfikatorem genezy zdarzenia sejsmicznego zarejestrowanego przez *gPhoneX* jako wstrząs górniczy był katalog Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej (*grss.gig.eu*). W katalogu tym znajdują się dane o dniu i czasie wystąpienia wstrząsu (data, gg:mm:ss.00), położeniu ogniska (WGS84:  $B$ ,  $L$ , głębokość w bazie przyjęta jako stała = 1 km) i lokalnej magnitudzie wstrząsu górniczego. Dane o położeniu ogniska wykorzystano do określenia odległości epicentralnej wstrząsu  $d$  od poszczególnych stanowisk grawimetrycznych 155, 157 i oznaczono literą  $d$  [km].

W monitorowanym przez sieć grawimetryczną obszarze w analizowanym okresie czasu wystąpiło 151 wstrząsów górniczych o różnej intensywności i odległości od stacji grawimetrycznych. Drgania podłoża od większości z nich (132) zarejestrowane zostały grawimetrami *gPhoneX*, przy czym przyrząd 155 zarejestrował 103 zdarzenia z odległości 0,74 – 62,62 km, a 157 - 125 zdarzeń z odległości 4,48 – 48,47 km. 100 zdarzeń zarejestrowano na obu stanowiskach pomiarowych. Utworzony z tych rejestracji zbiór danych o zdarzeniach sejsmo-grawitacyjnych liczył 228 rekordów obejmujących  $\Delta g^{\max}$ ,  $\Delta V^{\max}$ ,  $\Delta P^{\max}$ ,  $d$  oraz wartości ich magnitudy lokalnej zmieniającej się w przedziale 2,1 – 3,8, co odpowiada energiom  $1,14 \cdot 10^6$  J –  $1,05 \cdot 10^9$  J. W analizowanym zbiorze danych wartości ( $\Delta g^{\max}$ ) zmieniają się w przedziale 20,30 – 71 134,06 mGal i zależą od odległości od wstrząsu oraz jego energii.

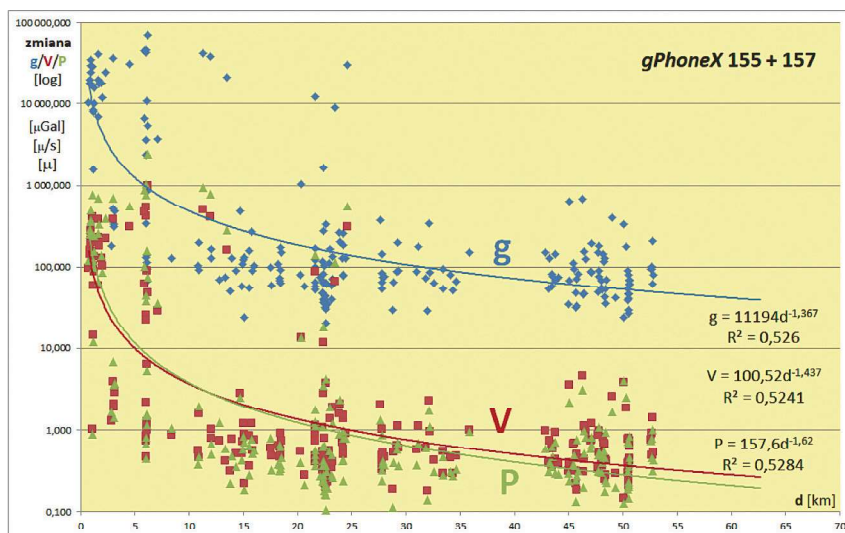
Kompletny zbiór danych przeanalizowano poszukując zależności funkcyjnych pomiędzy wartościami  $\Delta g^{\max}$ ,  $\Delta V^{\max}$ ,  $\Delta P^{\max}$  a odległością epicentralną  $d$  wszystkich wstrząsów górniczych zarejestrowanych przez oba grawimetry sieci. Najlepsze dopasowania okazały się funkcjami potęgowymi typu  $f(x) = a \cdot x^b$ . Na rys. 5, 6 i 7 przedstawione są uzyskane zależności wraz z pełnym wzorem funkcji regresji, dla której otrzymano najlepsze dopasowanie oraz wartości współczynnika determinacji  $R^2$  w przedziale wartości od 0 do 1. Współczynnik ten jest miarą jakości dopasowania danych empirycznych do modelu i określa jaki procent jednej zmiennej wyjaśnia zmienność drugiej. W tab. 1 zamieszczono też procentowy format współczynnika determinacji oraz wartość współczynnika zbieżności ( $\phi^2 = 1 - R^2$ ), który określa, jaka część zaobserwowanej w próbie zmienności  $\Delta g^{\max}$ ,  $\Delta V^{\max}$ ,  $\Delta P^{\max}$ , nie pasuje do modelu i/lub mieści się w jego błędzie.

Uzyskane dopasowanie krzywej potęgowej oraz wartości  $R^2 = 0,53$  dla maksymalnych zmian  $g$ : ( $\Delta g^{\max}$ ) w zbiorze danych z obu stanowisk (rys. 5) oznaczają, że zmiana przyspieszenia ziemskiego jest wyraźnie zdeterminowana odległością epicentralną  $d$ . Im bliższa odległość względem stanowisk grawimetrów tym rejestrowany efekt grawitacyjny jest większy. Zależność ta maleje ze wzrostem odległości  $d$ .

Estymacja maksymalnych zmian  $V$  i  $P$  dla zbioru danych z obu stanowisk krzywą potęgową i wartości  $R^2$  na poziomie 0,52 podobnie jak w przypadku  $g$  oznaczają, że wielkości te zależą od odległości  $d$ . Mimo tego dla 48% zdarzeń przyczyną zmian  $g$ ,  $V$ ,  $P$  wyjaśnić należy innymi czynnikami niż odległość  $d$ . Spowodowane to może być np. anizotropią budowy geologicznej regionu, która jest przyczyną innej odpowiedzi górotworu na przebieg fali sejsmicznej od epicentrum do rejonu stanowiska *gPhoneX* 155 i do 157.

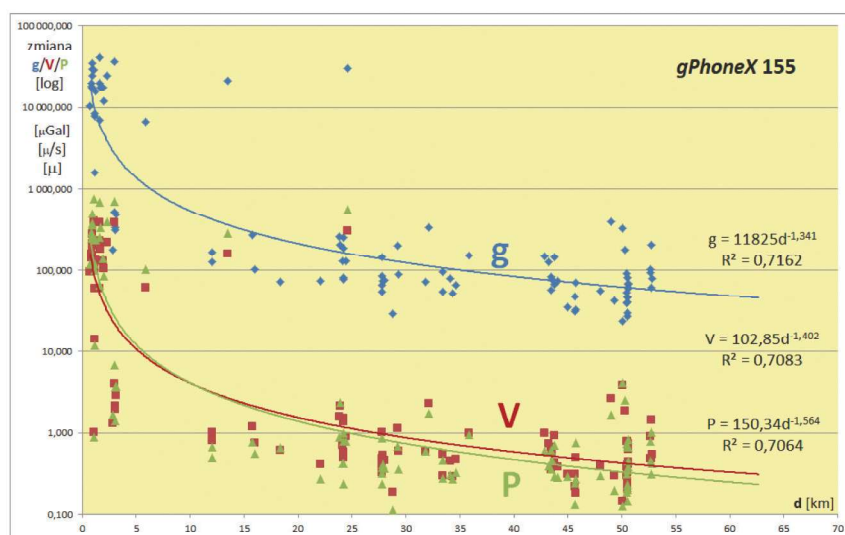
Podobnej analizie poddano zbiory rejestracji uzyskanych z poszczególnych grawimetrów osobno. Na rys. 6 przedstawiono zależności funkcyjne dla stanowiska 155 w Rybniku. Najlepsze dopasowanie do zbioru 103 rekordów, podobnie jak dla połączonego zbioru danych uzyskano dla funkcji potęgowej. Jednak uwagę zwraca znacznie silniejsza zależność funkcyjna wszystkich badanych wielkości  $\Delta g^{\max}$ ,  $\Delta V^{\max}$ ,  $\Delta P^{\max}$  od zmiennej  $d$  niż w przypadku połączonych zbiorów dla warunków górniczych rejonu Katowic i Rybnika.

Współczynnik determinacji  $R^2$  osiąga tu wartość bliska 72% dla  $\Delta g^{\max}$  oraz 71% dopasowania w przypadku  $\Delta V^{\max}$  i  $\Delta P^{\max}$ . Oznacza to, że dla stanowiska 155 jedynie na 28-29% zdarzeń sejsmo-grawitacyjnych wpływ mają czynniki inne niż odległość epicentralna. Jest to najprawdopodobniej związane z lokalizacją stanowiska pomiarowego w strefie epicentralnej zjawisk sejsmicznych, chociaż krzywa regresji obejmuje również zjawiska położone w strefie dalekiej. Zależność statystyczną znacznie pogarsza nietypowy wstrząs z kopalni Budryk (rys. 4), którego genezę tylko pośrednio można wyjaśnić eksploatacją górniczą. Jego pochodzenie związane jest z aktywnością granicy pomiędzy podłożem krystalicznym a skałami osadowymi, co było odpowiedzialne za pojawienie się quasi-górniczych wstrząsów wtórnych. Po usunięciu tego zdarzenia ze zbioru danych, wartości  $R^2$  osiągają większe wartości odpowiednio dla  $\Delta g^{\max}$  0,76,  $\Delta V^{\max}$  0,75 oraz dla  $\Delta P^{\max}$  0,75.



Rys. 5. Zależność amplitudy zmian  $g$  oraz maksymalnych amplitud prędkości i przemieszczenia od odległości epicentralnej wstrząsu górniczego z okresu 01.11.2018-17.12.2019. gPhoneX 155 i 157

Fig. 5. Amplitude of  $g$  changes and maximum amplitudes of velocity and displacement versus epicentral distance of mining tremor from the period 01.11.2018-17.12.2019. gPhoneX 155 and 157



Rys. 6. Zależność amplitudy zmian  $g$  oraz maksymalnych amplitud prędkości i przemieszczenia od odległości epicentralnej wstrząsu górniczego z okresu 01.11.2018-17.12.2019. gPhoneX 155 – Rybnik

Fig. 6. Amplitude of  $g$  changes and maximum amplitudes of velocity and displacement versus epicentral distance of mining tremor from the period 01.11.2018-17.12.2019. gPhoneX 155 – Rybnik

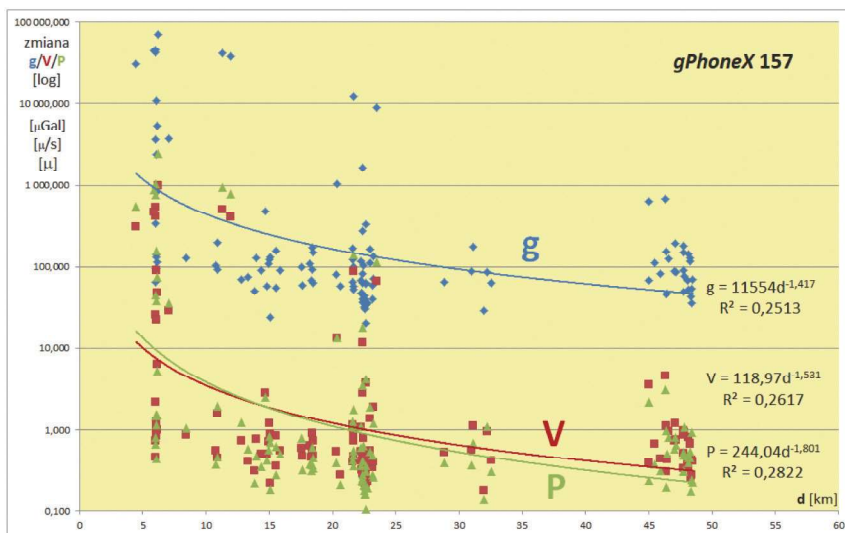
Odległość epicentralna zjawisk dla analizy danych z grawimetru 155 w Rybniku ma nieco większy (ok. 2%) wpływ na maksymalną zmianę wartości przyspieszenia ziemskiego niż na zmiany prędkości drgań i przesunięcia pionowego w miejscu rejestracji wstrząsu. Wynika to z faktu, że na niemal odwrotne wartości parametrów regresji dla zbioru połączonych danych znacząco wpływają rozkłady dla rejonu Katowic.

Zależności funkcyjne uzyskane dla grawimetru 157, prowadzącego rejestrację w Katowicach, przedstawiono na rys. 7. Dopasowania krzywych trendu utworzonych dla 125 rekordów są tu znacznie słabsze z uwagi na fakt, że grawimetr ten, pracując w obszarze oddalonym od aktywnych kopalń, zapisuje jedynie wstrząsy w sejsmicznym dalekim polu, w odległości przekraczającej 4,5 km.

Brak wstrząsów z bliskiego pola negatywnie wpływa na dopasowanie do modelu. Odległość epicentralna zjawisk ma większy (o 2-3%) wpływ na maksymalną zmianę wartości  $\Delta P^{\max}$  niż na pozostałe dwie wielkości. Może to wynikać z faktu, że bliższe wstrząsy generują większe maksymalne przemieszczenia pionowe rejestrowane przez grawimetry, a w mniejszym stopniu dotyczy to maksymalnych wartości  $g$  i  $V$ .

Parametry wszystkich uzyskanych aproksymowanych dopasowań oraz funkcje krzywych regresji zestawiono w tab. 1.

Dla wszystkich zdarzeń sejsmo-grawitacyjnych przemieszczenie pionowe osiąga nieco większe wartości w polu bliskim niż prędkość drgań (rys. 5, 6 i 7). Sytuacja ta ulega odwróceniu w polu dalekim. Ta charakterystyczna zmiana następuje dla połączonego zbioru rejestracji ze stanowisk 155



**Rys. 7. Zależność amplitudy zmian g oraz maksymalnych amplitud prędkości i przemieszczenia od odległości epicentralnej wstrząsu górniczego z okresu 01.11.2018-17.12.2019. gPhoneX 157 – Katowice**

**Fig. 7. Amplitude of g changes and maximum amplitudes of velocity and displacement versus epicentral distance of mining tremor from the period 01.11.2018-17.12.2019. gPhoneX 157 – Katowice**

i 157 w odległości  $d = 14$  km, dla stanowisk traktowanych osobno, odpowiednio dla grawimetru 155 w odległości  $d = 12$  km, a dla 157  $d = 16$  km.

**6. Podsumowanie i wnioski**

Przeprowadzona analiza wskazuje, że dla dobowych krzywych zmian g próbkowanych z częstotliwością 1 Hz wstrząsy pochodzenia antropogenicznego mają kształt ostrych „pików”, co wyraźnie odróżnia je od długotrwałych wstrząsów naturalnych, np. trzęsień ziemi. Jest to spowodowane relatywnie rzadkim opróbowaniem szybkozmiennych sygnałów o krótkim czasie trwania (rzędu kilku sekund), jakimi są drgania podłoża indukowane wstrząsami górniczymi. Dochodzące do grawimetrów fale sejsmiczne od dalekich i silnych wstrząsów pochodzenia naturalnego powodują drgania o czasie trwania często przekraczającym 1 godzinę i więcej. Na ich zapisach można wyróżnić poszczególne typy fal (podłużne, poprzeczne,

powierzchniowe). Na zapisach wstrząsów górniczych wszystkie te fale grupują się w jeden sygnał sejsmo-grawitacyjny.

Przeprowadzona podstawowa analiza statystyczna zbioru danych zawierających grawimetryczne sygnatury 132 zdarzeń sejsmicznych wskazuje, że sieć złożona z dwóch grawimetrów pływowych pozwala na rejestrację (bez lokalizacji epicentrum) większości górniczych wstrząsów górotworu występujących na terenie GZW, nawet z odległości dochodzących do 60 km. System dostarcza więc danych o intensywności sejsmo-grawitacyjnych nagłych skoków grawitacji w skali całego GZW.

Możliwość detekcji sygnału sejsmo-grawitacyjnego pochodzącego od wstrząsu górniczego jest silnie uzależniona od jego intensywności tj. magnitudy lokalnej oraz odległości ogniska od stanowiska obserwacyjnego. Pod względem statystycznym wyraźnie silniejsza jest zależność maksymalnej amplitudy sygnału grawimetrycznego od odległości od ogniska dla danych zarejestrowanych przez grawimetr *gPhoneX* 155 na stanowisku w rejonie eksploatującej kopalni ROW

**Tabela 1. Parametry najlepszych dopasowań w analizie regresji dla ( $\Delta g^{max}$ ,  $\Delta Vg^{max}$ ,  $\Delta Pg^{max}$ ): równanie regresji, współczynnik determinacji oraz współczynnik zbieżności**

**Table 1. Parameters of the best matches in the regression analysis of ( $\Delta g^{max}$ ,  $\Delta Vg^{max}$ ,  $\Delta Pg^{max}$ ): regression formula, coefficient of determination, coefficient of convergence**

<i>gPhoneX</i>	liczebność zbioru	zmienna	$\Delta g^{max}$	$\Delta Vg^{max}$	$\Delta Pg^{max}$
155 i 157	228	Równanie regresji	11194·d <sup>-1,367</sup>	100,52·d <sup>-1,437</sup>	157,60·d <sup>-1,620</sup>
		R <sup>2</sup>	0,5260	0,5241	0,5284
		R <sup>2</sup> [%]	53%	52%	53%
		$\phi^2 = 1 - R^2$ [%]	47%	48%	47%
155	103	Równanie regresji	11825·d <sup>-1,341</sup>	102,85·d <sup>-1,402</sup>	150,34·d <sup>-1,564</sup>
		R <sup>2</sup>	0,7162	0,7083	0,7064
		~R <sup>2</sup> [%]	72%	71%	71%
		$\phi^2 = 1 - R^2$ [%]	28%	29%	29%
157	125	Równanie regresji	11554·d <sup>-1,417</sup>	118,97·d <sup>-1,531</sup>	244,04·d <sup>-1,801</sup>
		R <sup>2</sup>	0,2513	0,2617	0,2822
		~R <sup>2</sup> [%]	25%	26%	28%
		$\phi^2 = 1 - R^2$ [%]	75%	74%	72%

w Rybniku. Słabe dopasowanie krzywych modelowych dla urządzenia 157 w Katowicach wynika z braku występowania zdarzeń bliskich (stacja poza bliskim polem falowym). W przyszłości poprzez powiększenie zbioru zdarzeń podanych analizie prawdopodobnie uda się uzyskać lepsze dopasowania krzywych modelowych dla poszczególnych stanowisk oraz całej sieci sejsmo-grawimetrycznej. Uzyskane wyniki mogą pomóc w lepszym zrozumieniu źródeł wstrząsów górniczych, uzyskując więcej danych na temat relaksacji naprężeń w strefach rozluźnień lub kumulowania naprężeń w warstwach skalnych przed ścianą wydobywczą.

Dalsze badania nad zastosowaniem ciągłego monitorowania zmian grawitacji na terenach górniczych będą dotyczyły zmian grawitacji przed i po wystąpieniu wstrząsu. W przyszłości, jeśli będzie możliwość zainstalowania trzeciego grawimetru *gPhoneX*, możliwe stanie się badanie przestrzennego położenia sygnałów sejsmo-grawitacyjnych metodą triangulacji. Dane uzyskane z sieci grawitacyjnej mogłyby wówczas mieć wyższą wartość uzupełniającą zbioru danych seismologicznych.

*Praca jest częścią projektu EPOS-PL - European Plate Observing System. Projekt jest finansowany w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 i współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (EFRR). Numer projektu: POIR.04.02.00-14-A003 / 16-00.*

## Literatura

- BATTAGLIA M., GOTTSMAN J., CARBONE D., FERNANDEZ J. 2008 - 4D volcano gravimetry. *Geophysics* 73(6):WA3-WA18. <https://doi.org/10.1190/1.2977792>
- BUŁA Z., KOTAS A. 1994 - Geological atlas of the Upper Silesian Coal Basin. Wydawnictwa Geologiczne. Warszawa.
- DUBIŃSKI J., STEC K., BUKOWSKA M. 2019 - Geomechanical and tectonophysical conditions of mining-induced seismicity in the Upper Silesian Coal Basin in Poland: A case study. *Archives of Mining Sciences* 64(1):163-180.
- FAJKLEWICZ Z. 1977b - Microgravity aspects of mine tremors generation. Rockbursts and seismicity in mines. Edited by S.I. Gibowicz, S. Lasocki. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield (331-336).
- FAJKLEWICZ Z. 1981b - First attempts at forecasting rock burst in mines by microgravimetry method. 43 rd Meeting of EAEG. Lido Island Venice May 26-29, Abstracts of Papers (47).
- FAJKLEWICZ Z. 1981c - Pierwsze próby prognozowania wstrząsów górniczych metodą mikrogravimetryczną. „Przegląd Górniczy” nr 10 (517-525).
- FAJKLEWICZ Z. 1983b - Rock-burst forecasting and genetic research in coal-mines by microgravimetry method. *Geophysical Prospecting*, V.31, No 5 (748-765).
- FAJKLEWICZ Z. 1990b - Microgravimetric prediction for mine tremors and destabilization process in the rock mass. *Advances in Coal Geophysics*, Editor R.K. Verma, AEG-India, Hyderabad (11-18).
- FAJKLEWICZ Z. 1983b - Rock-burst forecasting and genetic research in coal-mines by microgravimetry method. *Geophysical Prospecting*, V.31, No 5 (748-765).
- FAJKLEWICZ Z., JAKIEL K., OSTROWSKI C. 1986a - Results of prediction of rock bursts and rockmass deformations by the microgravity method. *Society of Mining Engineers USA, Annual Bound Volume of Transactions* (271-279).
- GODEY S., BOSSU R., GUILBERT J., MAZET-ROUX G. 2006 - The Euro-Mediterranean Bulletin: A Comprehensive Seismological Bulletin at Regional Scale. *Seismological Research Letters* vol. 77, no 4 July/August.
- KARWASIECKA M. 1996 - Atlas Geotermiczny Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Państwowy Instytut Geologiczny. Warszawa.
- KOTYRBA A., MICHALAK J. 1987 - Geotermia GZW i perspektywy jej wykorzystania. *Mat. III Konf. Nauk. Tech. Energia i jej wpływ na rozwój gospodarki narodowej*. JEN, Warszawa.
- KOTYRBA A., BALICKI A., KORTAS L. 2005 - Zmiany regionalnego pola grawitacji w północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w latach 2002-2003. „Przegląd Geologiczny” nr 4, p. 299-305.
- KOTYRBA A. 2014 - Czasowe zmiany pola siły ciężkości w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym i ich związek z eksploatacją górniczą. „Przegląd Górniczy” nr 5, p. 48-57.
- LYNESS D. 1985 - The gravimetric detection of mining subsidence. *Geophysical Prospecting*, 33 p. 567-576.
- MUTKE G., KOTYRBA A., LURKA A., OLSZEWSKA D., DYKOWSKI P., BORKOWSKI A., ARASZKIEWICZ A., BARAŃSKI A. 2019 - Upper Silesian Geophysical Observation System - a unit of the EPOS project. *Journal of Sustainable Mining* Volume 18, Issue 4, p. 198-207.
- MARCAK H., MUTKE G. 2013 - Seismic activation of tectonic stresses by mining. *Journal of Seismology* Vol. 17, Issue 4, p.1139-1148.
- Micro-g LaCoste 2013a - *gPhoneX*. Version 4.0.01, PN: 115-550-002E. 01 October 2013.
- Micro-g LaCoste 2013b - *gMonitor Gravity Data Acquisition and Processing Software User's Manual*. Version 2.0. PN: 115-550-001B. 01 October 2013.
- Micro-g LaCoste 2016 - *Odin Leveling Platform Operation Manual*. PN: 115-550-004A. 15 July 2016.
- MUTKE G., DUBIŃSKI J. 2016 - Seismic intensity induced by mining in relations to weak earthquakes. *Proc. of the 24th World Mining Congress. Part. Underground Mining*. Rio de Janeiro, p. 399-407.
- NIEBAUER T.M., MACQUEEN J., ALIOD D., FRANCIS O. 2011 - Monitoring earthquakes with gravity meters. *Geodesy and Geodynamics* 2(3):71-75.
- SOŚNICA K., ROHM W., BOSY J., ZAJDEL R., HADAS T., KAPŁON J., KUDŁACIK I., PAWLUSZEK K., SIERNY J., ILIEVA M., BORKOWSKI A., KRYŃSKI J., DYKOWSKI P., MUTKE G., KOTYRBA A., OLSZEWSKA D. 2018 - Monitoring of Earth surface displacements using integrated multi-GNSS, gravity, seismic, and InSAR data in the framework of GGOS-PL++. 42nd COSPAR Scientific Assembly. Held 14-22 July Pasadena, CA, USA, p. 37-18.
- STEC K. 2007 - Aktywność sejsmiczna Górnośląskiego Zagłębia Węglowego - 30 lat ciągłej obserwacji przez Górnośląską Regionalną Sieć Seismologiczną. „Przegląd Górniczy” nr 7-8, p.14-22.
- SUGIHARA M., NAWA K., NISHIA Y., ISHIDO A T., SOMA N. 2013 - Continuous gravity monitoring for CO2 geo-sequestration. *Elsevier Energy Procedia* 37, p. 4302-4309.
- SUGIHARA M., ISHIDO T. 2008 - Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry. *Geophysics* 73: WA p. 37-47.
- SZCZERBOWSKI Z. 2003 - Surface deformations and changes in gravity - relations in the conditions of the exploited rock mass. *Biblioteka Eksploatacji Podziemnej*. IGSMiE PAN, Kraków.
- WIERZCHOWSKA Z. 1981 - Regionalna Sieć Mikrosejsmologiczna na Górnym Śląsku, „Przegląd Górniczy” nr 5, p. 222-228. [www.grss.eu](http://www.grss.eu) [www.emsc-csem.org](http://www.emsc-csem.org)

Artykuł wpłynął do redakcji – listopad 2019  
Artykuł akceptowano do druku – 25.01.2020