



Grawimetryczny system ciągłej obserwacji wstrząsów indukowanych działalnością górnictwem

Gravimetric system for continuous observation of mining-induced tremors

Andrzej Kotyrba*)

Treść: Podziemne wydobywanie kopalin przeobraża rozkład masy w przypowierzchniowych warstwach skorupy ziemskiej. W rejonach wyrobisk górniczych następuje jej rozrzedzenie poprzez zmniejszenie gęstości objętościowej górotworu. W górotworze otaczającym rejon z wyrobiskami następują duże zmiany zagęszczenia masy. Zjawisko to powoduje wstrząsy górotworu o dużej energii, które czasami powodują dynamiczne przemieszczenia skał do wyrobisk górniczych, ich deformacje, a także wypadki wśród załóg górniczych. Wstrząsy w kopalniach mogą być monitorowane pomiarami grawimetrycznymi. W artykule opisano wyniki ciągłych pomiarów zmian pola grawitacji w roku 2019 na stanowisku w Rybniku (KWK ROW). Pomiary przeprowadzono systemem opracowanym przez firmę Micro-g LaCoste, składającym się z grawimetru pływowego gPhoneX oraz zautomatyzowanej platformy samopoziomującej ODIN. Platforma ta amortyzuje ruch podłoża grawimetru po wystąpieniu wstrząsu, zapewniając instrumentowi utrzymanie poziomu w trakcie dalszych faz drgań podłoża. Przeanalizowano również zbiór danych o wysokoenergetycznych wstrząsach o magnitudzie lokalnej $M > 3$, które wystąpiły w trakcie prowadzenia jednej ze ścian w pokładzie węgla 703/1 przez KWK ROW Ruch Rydułtowy. Na tej podstawie sformułowano wnioski w zakresie możliwości wykorzystania danych z monitorowania grawimetrycznego w problematyce badania i przeciwdziałania zjawiskom geodynamicznym w podziemnych wyrobiskach eksploatacyjnych. Przedstawiono również relacje pomiędzy energią wstrząsów określaną z danych sejsmologicznych a amplitudą sygnałów grawimetrycznych i na tej podstawie propozycję grawimetrycznej skali intensywności wstrząsów górniczych.

Abstract: Underground mining transforms the distribution of mass in the subsurface layers of the Earth's crust. In the areas of mining excavations, it is diluted by reducing the volumetric density of the rock mass. In the rock mass surrounding the areas with workings occur large changes in density. This phenomenon causes tremors of the rock mass of high energy, which sometimes cause rock bursts into mining excavations, their deformation as well as accidents among mining crews. Shocks in mines can be monitored by gravimetric measurements. The article describes the results of continuous measurements of changes in the gravity field in 2019 at the site in Rybnik (KWK ROW). Measurements were carried out with a system developed by Micro-g LaCoste, consisting of a gPhoneX tide gravimeter and an automated self-levelling platform ODIN. This platform absorbs the movement of the gravimeter's ground after a shock has occurred, ensuring that the instrument maintains its level during further phases of ground vibrations. The data set on high-energy tremors with a local magnitude $M > 3$, which occurred during the driving of one of the walls in the 703/1 coal seam by the Coal Mine ROW Ruch Rydułtowy, was also analyzed. On this basis, conclusions were formulated regarding the possibility of using data from gravimetric observations in the research and counteracting geodynamic phenomena in underground mining excavations. The relationship between the energy of tremors determined from seismological data and the amplitude of gravimetric signals was also presented, and on this basis a proposal of a gravimetric scale of mining tremors intensity was presented.

Słowa kluczowe:

kopalnie podziemne, wstrząsy sejsmiczne, tąpnięcia, grawitacja, monitorowanie

Keywords:

underground mines, tremors, rock bursts, gravimetric observations

1. Wprowadzenie

Ruchy górotworu wywołane źródłami sejsmicznymi i parasejsmicznymi mierzy się różnymi czujnikami elektro-mechanicznymi. W zależności od konstrukcji czujnika, każdy z nich inaczej odwzorowuje podstawowe rodzaje ruchów prostoliniowych i krzywoliniowych, którymi są wibracja, wstrząs i obrót (rotacja). Wszystkie trzy pierwsze wymienione rodzaje ruchu są w rzeczywistości przejawami zmian jego prędkości i przyspieszenia w ruchu translacyjnym, mierzonego w różnych okresach (Mutke i in. 2020). W systemach sejsmolo-

gicznych wykorzystywanych do pomiaru ruchów górotworu w kopalniach podziemnych stosowane są głównie sejsmometry (mierzą przemieszczenie), geofony (mierzą prędkość drgań) i akcelerometry (mierzą przyspieszenie drgań). Czujniki te zapisują zmiany amplitudy w czasie (drżania) podłoża, na którym są posadowione w postaci szeregu czasowego. W badaniach sejsmologicznych i wulkanologicznych do pomiaru drgań wykorzystuje się również grawimetry (Battaglia et al. 2008).

Badania nad wykorzystaniem metody grawimetrycznej do prognozowania wstrząsów i tąpnięć w polskich kopalniach węgla kamiennego były prowadzone w latach 1981-2007 (Fajkiewicz 1981, 1983). W badaniach tych wykonywano

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

okresowo serie pomiarów grawimetrycznych na punktach zlokalizowanych w spągu chodników przyścianowych, a następnie analizowano różnice w wartościach przyspieszenia siły ciężkości g rejestrowanych w kolejnych seriach pomiarowych, wyznaczając miejsca, w których następowały zmiany wartości różnicowych. Miejsca przyrostów wartości różnicowych identyfikowano z rejonami przyrostu naprężeń w górotworze, które mogą być źródłami silnych wstrząsów i tąpnięć. Metodyka tych pomiarów była zbliżona do stosowanej na powierzchni terenu dla innych celów prospekcyjnych. Wykonywanie pomiarów grawimetrycznych w wyrobiskach podziemnych było czasowe i pracochłonne. Metodyka wykonywania pomiarów grawimetrem pływowym jest całkowicie odmienna. Podobnie jak czujniki sejsmometryczne instrument pomiarowy usytuowany jest stacjonarnie w wybranym miejscu. Pomiar zmian natężenia siły ciężkości wykonywany jest automatycznie w stałych odstępach czasu i zapisywany w pamięci instrumentu w postaci cyfrowego szeregu czasowego. W przypadku posadowienia bezpośrednio na skale, instrument zachowuje się jak sejsmometr rejestrujący ruchy podłoża w zakresie częstotliwości uzależnionych od czasu próbkowania. Jest to przedział bardzo niskich częstotliwości, gdyż produkowane obecnie grawimetry nie pozwalają na próbkowanie sygnału większego niż 7 próbek na sekundę (Micro-g LaCoste 2013a; Micro Lacoste 2016; Mutke, Kotyrba i in. 2019; Kotyrba i Kortas 2020). Posadowienie grawimetru na podłożu gruntowym poprzez platformę samopoziomującą sprawia, iż staje się on nowym rodzajem czujnika odpowiedzi masy na powierzchni Ziemi na ruch podłoża o charakterze wstrząsu. A właśnie taki charakter ma ruch górotworu generowany podziemną eksploatacją górnictwem w obszarze bliskim źródła (strefa epicentralna o promieniu zależnym od energii wstrząsu zmieniającym się od kilku do kilkudziesięciu km). Wstrząsy pochodzenia górnictwem w strefie bliskiej źródła w świetle pomiaru sejsmometrami i akcelerometrami są sygnałami sinusoidalnymi o czasie trwania zmieniającym się od ok. 1 do kilkunastu sekund (Stec 2007; Mutke 2015; Mutke, Dubiński 2016). Najczęściej trwają kilka sekund. Czas trwania sygnałów zależy głównie od odległości stanowiska pomiarowego od źródła. W bliskiej strefie źródła wstrząsu sygnał powstaje w wyniku superpozycji wolno i szybkozmiennych odkształceń propagujących w górotwór fale lepko sprężyste. W strefie dalekiej rejestrowane są jedynie drgania podłoża wywołane przejściem fal sejsmicznych (podłużnych, poprzecznych

i powierzchniowych) po ich rozdzieleniu na grupy różniące się rodzajami ruchu i prędkościami propagacji w skałach.

2. Zmiany gęstości górotworu w rejonach wstrząsów

Z dotychczasowych badań nad polem grawitacji wynika, że obszar, w którym zachodzą zmiany gęstości masy generuje własne pole grawitacji (Fajkiewicz 2007). Zgodnie z prawem powszechnego ciężenia (Newtona) względną zmianę natężenia siły ciężkości g w danym punkcie na powierzchni terenu, który ma jednostkową masę i jest oddalony od środka przestrzennej strefy, w której zachodzą zmiany gęstości można opisać wzorem (1).

$$\vec{g} = -G \frac{dm}{r^2} * \frac{\vec{r}}{r} \quad (1)$$

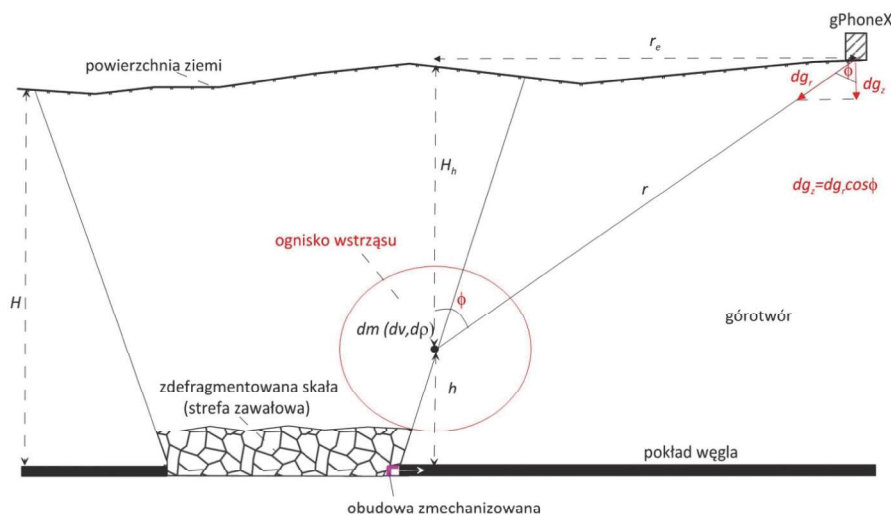
gdzie:

- G – stała grawitacji, $6,67430 * 10^{-11}$ [$m^3 kg^{-1}s^{-2}$]
- dm – zmiana masy w strefie ogniskowej wstrząsu ($=dq dV$),
- r – odległość środka masy ciała przyciągającego od ciała przyciąganego

Siła ta jest przyłożona od ciała przyciąganego (masy w instrumencie pomiarowym) i skierowana wzdłuż promienia r do środka masy przyciągającej dm . Znak „-” oznacza, że siła ta jest skierowana od ciała o masie jednostkowej (masa w grawimetrze) do ciała o masie dm .

Zmiana masy następuje w górotworze w przestrzeni o objętości dV , która zmienia swą gęstość przestrzenną o wielkość $d\rho$. Geometrycznie strefę, w której następują zmiany gęstości można aproksymować bryłą przestrzenną odpowiadającą strefie wpływów, której rzut na powierzchnię terenu odpowiada granicy strefy wpływów od dynamicznej niecki osiadań. Po zakończeniu eksploatacji daną ścianą strefa zmian gęstości górotworu jest bryłą, której rzut na powierzchnię terenu odpowiada granicy strefy wpływów statycznej niecki osiadań (Kwiatek 2002; Kotyrba 2014; Kowalski 2020). Zastępując masę iloczynem zmian gęstości i objętości we wzorze 1 otrzymujemy relację pomiędzy natężeniem pola siły ciężkości a geometrycznym wymiarem strefy zmieniającej gęstość w postaci wzoru (2) na linii pomiędzy środkiem masy w ognisku wstrząsu a masą w grawimetrze.

$$\vec{dg}_r = -G \frac{dq dV}{r^2} * \frac{\vec{r}}{r} \quad (2)$$



Rys. 1. Pole grawitacji w rejonie wstrząsu górnictwem
Fig. 1. Gravity field in the mining tremor area

Grawimetr mierzy składową pionową pola siły ciężkości (dg_z), której wartość zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.1 określa wzór 3.

$$dg_z = dg_r \cdot \cos\theta \quad (3)$$

Wartość ta jest mniejsza od wartości siły przyciągania strefy ogniskowej wstrząsu na linii łączącej jej środek masy z grawimetrem i maleje wraz ze wzrostem odległości pomiędzy punktu obserwacji grawimetrycznej a ogniskiem wstrząsu. Przykładowo dla punktu obserwacyjnego położonego w odległości epicentralnej wstrząsu równej jego głębokości ($r_e = H_h$) kąt θ wynosi 45° , a wartość natężenia składowej pionowej siły przyciągania wynosi już tylko ok. 0.71 wartości w linii jej działania (składowej radialnej). W dużej odległości od źródła wstrząsu wartość składowej pionowej dąży do zera.

3. Grawimetr pływowy gPhoneX z platformą samopoziomującą

Grawimetry pływowe generalnie przeznaczone są do pomiaru amplitudy pływów litosfery ziemskiej istotnych w geodezji i geofizyce ogólnej, gdyż pozwalają na pomiar przemieszczenia pionowego punktu na powierzchni ziemi, zachodzącego w czasie (współczynnik grawimetryczny) na skutek zmian pola grawitacji wywołanych ruchem obrotowym Ziemi, a także oddziaływaniem sił luni-solarnych. Są wykorzystywane również w badaniach trzęsień Ziemi (Niebauer i in. 2011), procesów wulkanicznych i geotermalnych (Olson, Warburton 1979; Nawa, Sugihara 2011; Sugihara i in. 2013).

Pływy litosfery są to różno-okresowe procesy falowe, w trakcie których skorupa ziemska ulega cyklicznym odkształceniom sprężystym (Doodson 1921; Darwin 2009; Dehant, i in. 1999; Fajkiewicz 2007; Neumayer 2010; Siwek 2021 i in.).

Zidentyfikowano wiele typów fal pływowych o różnych okresach czasu. Największą amplitudę mają fale pływowe powodowane obiegiem Księżyca wokół Ziemi, które widoczne są na rejestracjach grawimetrycznych w powtarzalnych cyklach dobowym i pół-dobowym, ściśle związanych z położeniem Księżyca względem Ziemi. Położenie to decyduje również o amplitudzie i czasie ruchów hydrosfery, którą tworzą oceany.

Ruch orbitalny Ziemi wokół Słońca jest powodem cyklicznych zmian oświetlenia kuli ziemskiej, co powoduje podział jej powierzchni na strefy klimatyczne uwidaczniające się w cyklu rocznym. Czynnikiem ten ma duży wpływ na pole siły ciężkości na terenach położonych na średnich szerokościach geograficznych zarówno półkuli północnej jak i południowej. Ma on wpływ na zjawiska sejsmiczne obserwowane w kopalniach podziemnych i poziom zagrożenia tąpnięciami.

Pod koniec 2018 roku na obszarze Górnego Śląska zainstalowano dwa grawimetry pływowe typu gPhoneX z platformami samopoziomującymi, wyprodukowane przez amerykańską firmę Micro-g LaCoste. Grawimetr o numerze seryjnym 155 zainstalowany jest w piwnicy Industrialnego Centrum Kultury Kopalni „Ignacy” w Rybniku – Niewiadomiu. Grawimetr o numerze seryjnym 157 zainstalowany jest w piwnicy budynku na terenie Głównego Instytutu Górnicztwa w Katowicach (Kotyrbka i in. 2020). W rzeczywistości grawimetry te, to złożone systemy pomiarowe, w których natężenie pola siły ciężkości jest tylko jedną z wielu wielkości pomiarowych i obliczeniowych zapisywanych przez nie w odstępach czasu 0,2 sekundy (częstotliwość próbkowania 5 Hz), uśrednianych w okresach 1-sekundowych i ostatecznie zapisywanych jako szereg czasowy w formacie tekstowym.

System składa się z czterech elementów (rys.2):

- grawimetr,
- platforma samopoziomująca,
- blok kalibracyjno-sterujący z zegarem rubidowym i układem UPS,



Rys. 2. Stanowisko grawimetryczne w piwnicy Industrialnego Centrum Kultury Kopalni „Ignacy” w Rybniku - Niewiadomiu. Grawimetr z platformą samopoziomującą na postumencie betonowym (prawa strona) i blok sterowania (lewa strona)

Fig. 2. Gravimetric station in the basement of the Industrial Cultural Center of the Ignacy Mine in Rybnik-Niewiadom. Gravimeter with a self-leveling platform on a concrete plinth (right side) and control block (left side)

– laptop z programami sterowania, akwizycji i podglądu rejestracji na bieżąco.

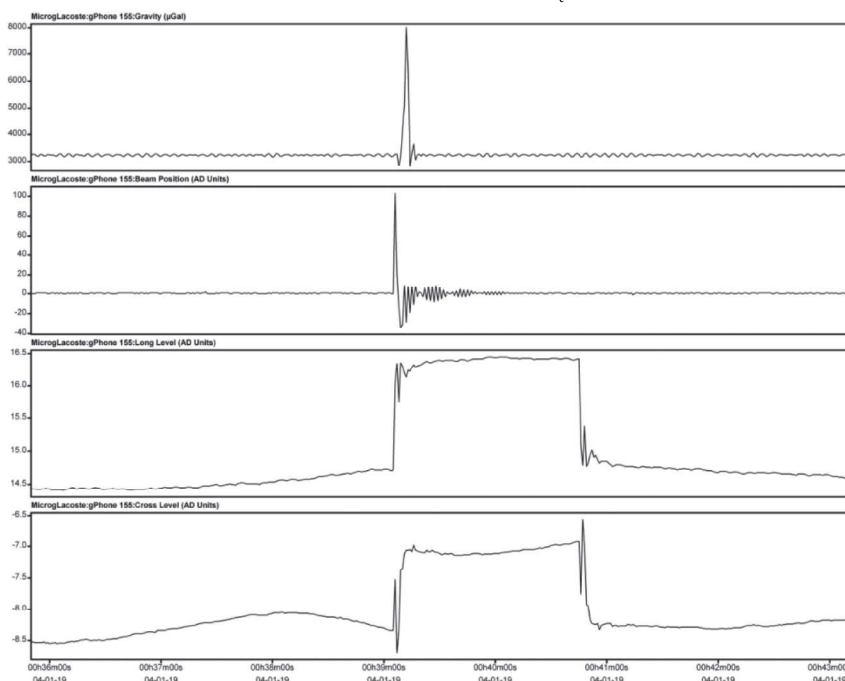
W 0,2- i 1- sekundowych odstępach czasu zapisywane są następujące dane w 20 pomiarowych i obliczeniowych kanałach systemu:

1. natężenie pola siły ciężkości g [μGal],
2. natężenie pola siły ciężkości po wprowadzeniu poprawek [μGal],
3. teoretyczna wartość fali pływowej sumarycznej - (wg. modelul ETGTAB - Timmen i Wenzel, 1995) [μGal],
4. wartość odchylenie od poziomu libelli podłużnej [AD],
5. wartość odchylenia od poziomu libelli poprzecznej [AD],
6. temperatura otoczenia [stopień C],
7. temperatura czujnika grawimetru [stopień C],
8. ciśnienie atmosferyczne [mBar],
9. ciśnienie w komorze czujnika [mBar],
10. odchylenie od pionu [AD],
11. wartość poprawki na odchylenie od poziomu [μGal],
12. wartość poprawki na dryft przyrządu [μGal],
13. wartość poprawki na ciśnienie w komorze czujnika [μGal],
14. wartość poprawki na zmianę ciśnienia atmosferycznego [μGal],
15. wartość poprawki na temperaturę otoczenia [μGal],
16. wartość poprawki na temperaturę komory czujnika [μGal],
17. wartość poprawki na ruch bieguna [μGal],
18. wartość poprawki na pływ oceanów [μGal],
19. prędkość ruchu V [m/s] - wielkość obliczana przez całkowanie szeregu czasowego g ,
20. przemieszczenie P [μ] - wielkość obliczana przez całkowanie szeregu czasowego V .

W związku z tym, że dane z kanału 2 mogą być wykorzystane przez kopalnię węgla kamiennego do oceny genezy wstrząsów i profilaktyki tąpniowej, są one udostępniane publicznie

przez Zakład Geologii i Geofizyki GIG w formie repozytorium dobowych rejestracji archiwalnych (wybieranych datą z kalendarza) oraz rejestracji bieżących aktualizowanych co 5 minut w aplikacji internetowej Górnośląskiego Obserwatorium Geofizycznego (www.gog.gig.eu). Identyfikacji źródeł wstrząsów można dokonać przeglądając katalogi sejsmiczne Europejsko-Śródziemnomorskiej Sieci Sejsmologicznej (www.emsc-csem.org) oraz Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej (www.grss.gig.eu).

Zadaniem platformy samopoziomującej jest tłumienie pierwszych faz ruchu podłoża i zapewnienie grawimetrowi utrzymania poziomu i pionu w trakcie dalszych faz ruchu. W rezultacie otrzymujemy zapis bezwładnościowej reakcji masy w układzie sprężyn o długości zerowej na wymuszenie kinematyczne o charakterze wstrząsu. Zapis ten w polu bliskim źródeł wstrząsów sejsmicznych jest zwykle nieregularny i znacznie różni się od zapisów otrzymywanych z innych czujników drgań. Zapis ruchów podłoża platformy rejestrowany jest, jako sygnały elektryczne przez dwie prostopadłe libelle. Na ich podstawie obliczana jest wartość poprawki sygnału grawitacyjnego, eliminującego wpływ ruchów podłoża na wartości pola siły ciężkości. W grawimetrze wbudowany jest pojemnościowy czujnik kontroli pionu. Zapisy z tych czujników pozwalają na pewną identyfikację sygnałów o charakterze wstrząsów (rys. 2). Przychodzące na teren GZW drgania podłoża z dalekich źródeł (trzęsienia ziemi), nawet gdy charakteryzują się relatywnie dużą amplitudą nie powodują włączania się platformy samopoziomującej ODIN, gdyż mają one charakter krótkookresowych wibracji. Ta cecha systemu obserwacji grawimetrycznej doskonale nadaje się do odróżniania sygnałów generowanych wstrząsami w kopalniach od sygnałów wywołanych przejściem przez stanowisko pomiarowe fal sejsmicznych generowanych dalekimi trzęsieniami Ziemi



Rys. 3. Zapis sygnałów od wstrząsu indukowanego eksploatacją w dniu 04.01.2019 w kanałach pomiarowych systemu grawimetru g_{155} z platformą ODIN (wartości g , odchylenie od pionu – odpowiednio 2 wykresy górne) i platformy samopoziomującej (odchylenie od poziomu na dwóch prostopadłych kierunkach po włączeniu się systemu tłumienia – odpowiednio 2 wykresy dolne)

Fig. 3. Record of signals from the mining induced shock on 04/01/2019 in the measurement channels of the g_{155} gravimeter system with the ODIN platform (g values, deviation from the vertical - 2 upper diagrams, respectively) and the self-leveling platform (deviation from the level in two perpendicular directions after activation of the dumping system - respectively 2 lower charts)

W momencie wystąpienia pierwszej fazy ruchu podłoża włącza się system samopoziomujący ODIN, który go tłumi (Micro-g LaCoste 2016). Tak samo reaguje czujnik kontroli pionu grawimetru (Micro-g LaCoste 2013a). Reakcja układu sprężynowego grawimetru (kanał g – 2b) jest opóźniona względem reakcji systemu platformy o ok. 1-3 sek. Sam ruch podłoża odwzorowuje się jakościowo na kontrolnych czujnikach poziomu platformy ODIN, na której stoi grawimetr (rys. 2 - dwa dolne wykresy) dwukrotnie - w pierwszej fazie ruchu (włączenia mechanizmu samopoziomującego) i w momencie wyłączenia się mechanizmu samopoziomującego platformę (po ok. 2 minutach).

Należy zauważyć, że czas trwania sygnału w kanale g wynosi ok. 12 sekund, a w kanale „beam control” wynosi ok. 1 minuty. W kanale czujnika poziomu grawimetru po sygnale głównym, podobnym do rejestrowanego w kanale g, widoczne są dwie grupy podobnych pod względem kształtu sygnałów, które mogą być zapisami wstrząsów lub są harmoniczne względem sygnału głównego.

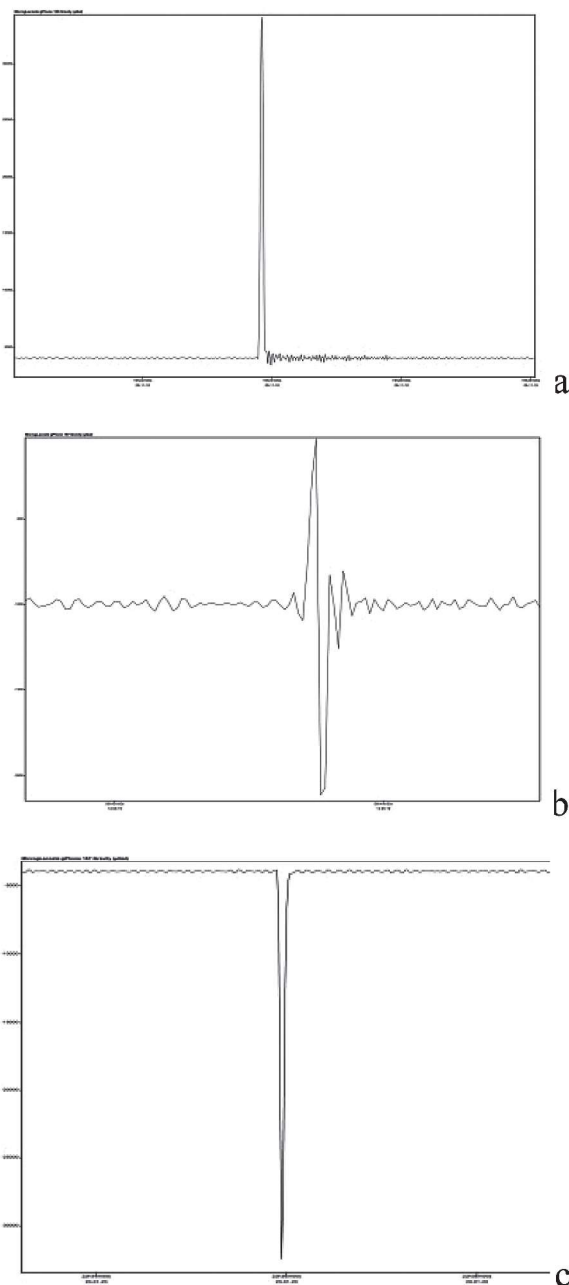
Głównym zadaniem grawimetrów pływowych jest ciągła rejestracja zmian pola grawitacji zachodzących w punkcie pomiaru pod wpływem ruchów obrotowych i orbitalnych Ziemi, Księżyca i Słońca oraz generowanych nimi ruchami litosfery, hydrosfery oraz atmosfery o charakterze falowym. Przrzędy te mierzą również wszelkie ruchy podłoża w tym generowane przyczynami antropogenicznymi i naturalnymi. W jaki sposób można wykorzystać rejestracje grawimetryczne w badaniach sejsmiczności górniczej przedstawiono w następujących rozdziałach artykułu.

4. Charakterystyka instrumentalna zapisów wstrząsów przez system gPhoneX z platformą ODIN

Rejestracje grawimetrycznych zapisów ruchów podłoża wywołanych wstrząsami przez system, chociaż są zbliżone do sinusoidalnych, mają w przypadku wstrząsów często sygnatury nieregularne ze względu na relatywnie rzadkie próbkowanie sygnału. Generalnie można je podzielić na trzy rodzaje, zależne od charakteru przebiegu szeregu czasowego:

- W zapisie dominuje dodatnia połowa sinusoidy o bardzo dużej amplitudzie zmiany g , i czasie trwania ok. 6-8 sek. Po niej amplituda sygnału silnie maleje i zanika zupełnie lub przechodzi w sinusoidalne drgania harmoniczne, w których dodatnie i ujemne części fali są do siebie zbliżone pod względem wartości (rys. 3a).
- Regularna sinusoida obejmująca kilka pełnych okresów. Amplituda fali albo maleje wykładniczo z czasem albo zwiększa się do pewnej wartości maksymalnej i następnie maleje. Dodatnie i ujemne części kolejnych faz fali są do siebie zbliżone pod względem wartości (rys.3b).
- W zapisie dominuje ujemna połowa sinusoidy o bardzo dużej amplitudzie zmiany g i czasie trwania ok. 6-8 sek. Po niej amplituda sygnału albo silnie maleje i przechodzi w regularne drgania harmoniczne, w których dodatnie i ujemne części fali są do siebie zbliżone pod względem wartości (rys. 3c).

Sygnatury o kształtach a i c przedstawionych na rysunku 4 generalnie rejestrowane są przy silnych energetycznie wstrząsach ($E > 10^6$). Natomiast sygnatury o kształcie b występują przy słabszych energetycznie wstrząsach.



Rys 4. Podstawowe rodzaje grawimetrycznych zapisów wstrząsów indukowanych działalnością górniczą (a,b,c)
Fig. 4. Basic types of gravimetric recordings of mining induced tremors (a, b, c)

5. Oscylacje pola siły ciężkości a sejsmiczność kopalń w GZW w cyklu rocznym

Pole siły ciężkości w określonym obszarze kuli ziemskiej ulega cyklicznym zmianom w czasie wywołanym przez oddziaływanie luni-solarne. W strefie klimatu umiarkowanego zmiany te są zgodne ze zmianami pory roku. Jest to dobrze widoczne przy analizie rocznych zapisów zmian wartości dobowych pola siły ciężkości. Ta prawidłowość zaznacza się również w analizie liczby silniejszych energetycznie wstrząsów w kopalniach ($M > 2.7$). Ich liczba oraz energia jest największa w okresie od przesilenia jesienno-zimowego do przesilenia wiosenno-letniego. Wyraźnie maleje ona w okresie późnej wiosny, lata i wczesnej jesieni (rys.4).

Zmiany wartości g w cyklu roku 2019 można podzielić na trzy następujące okresy:

- I. okres od 1 stycznia do 30 kwietnia. W tym czasie wartości g zmieniają się bardzo dynamicznie z dnia na dzień. W okresie tym wystąpiło 6 wstrząsów o energiach przekraczających magnitudę $M=2.9$. Wstrząs o magnitudzie $M=3.4$ został zarejestrowany w momencie wystąpienia tąpnięcia w rejonie jednej ze ścian KWK ROW.
- II. okres od 30 kwietnia do 31 sierpnia 2019. Oscylacje dobowych wartości pola siły ciężkości są niewielkie. W tym okresie zarejestrowano 5 wstrząsów wysokoenergetycznych.
- III. okres od 1 września do 31 grudnia 2019. Stopniowo rośnie dynamika i amplituda dobowych zmian pola siły ciężkości. Wzrasta również liczba i energia wstrząsów sejsmicznych. W tym okresie zarejestrowano 14 wstrząsów wysokoenergetycznych.

Mając na uwadze obserwowane w XX i XXI wieku zmiany klimatyczne, pierwszy z wymienionych wyżej okresów należałoby połączyć z trzecim i otrzymamy wtedy w cyklu rocznym następujące dwa okresy niepokrywające się z porami roku w klimacie umiarkowanym (I i II). Charakteryzują się one odmienną dynamiką zmian pola siły ciężkości i sejsmiczności w kopalniach (rys. 5).

- I. okres obejmujący czas od września do kwietnia. W okresie tym dynamika zmian pola siły ciężkości jest bardzo duża. W okresie tym rejestruje się również relatywnie dużą liczbę wysokoenergetycznych wstrząsów w kopalniach.
- II. okres obejmujący czas od maja do końca sierpnia. W okresie tym rejestruje się relatywnie małą liczbę wysokoenergetycznych wstrząsów w kopalniach.

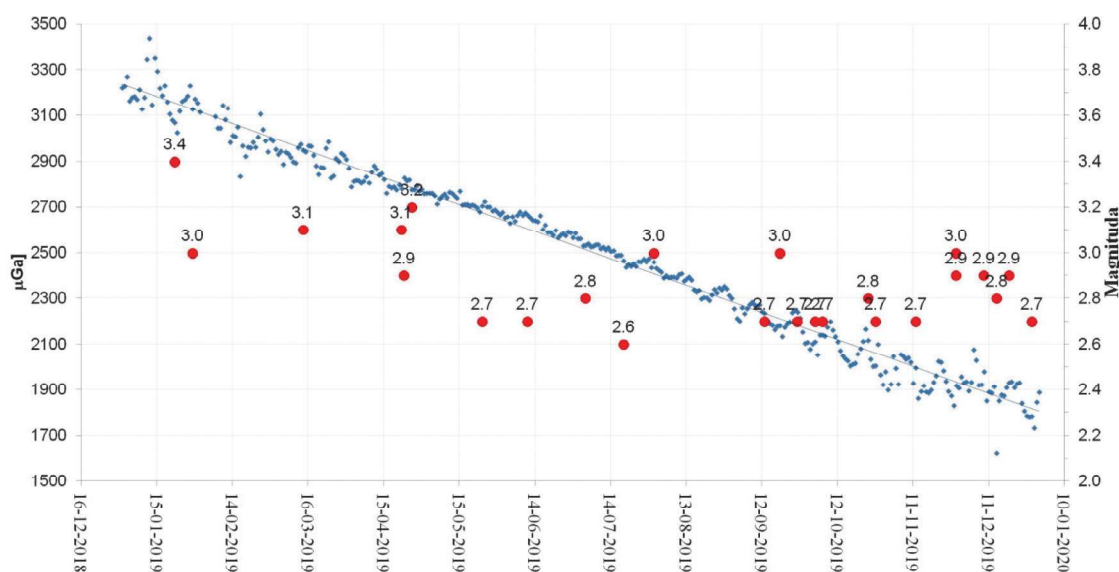
6. Zmiany pola siły ciężkości poprzedzające tąpnięcie w KWK ROW Ruch Rydułtowy w dniu 22.01.2019

Oscylacje pola grawitacji powodują oscylacje ciężaru skał zalegających w nadkładzie wyrobisk górniczych. Czynniki ten

powoduje, iż oscylacjom ulega również wartość naprężenia głównego w górotworze decydującego o mechanice skał. Z uwagi na powyższe poddano analizie rejestracje grawimetryczne z okresu, w którym, w trakcie prowadzenia ściany IV-E-E1 w południowym skrzydle uskoku kolejowego wystąpiło tąpnięcie. Wg informacji udostępnionej przez WUG w dniu 22 stycznia 2019 r. o godzinie 23³⁵ zaistniał wstrząs górotworu o energii $9,8 \times 10^7$ J, który spowodował tąpnięcie w ścianie IV-E-E1 i chodniku 3a-E-E1 badawczym w pokładzie 703/1 na poziomie 1150 m oraz wypadek zbiorowy w tej ścianie (www.wug.gov.pl).

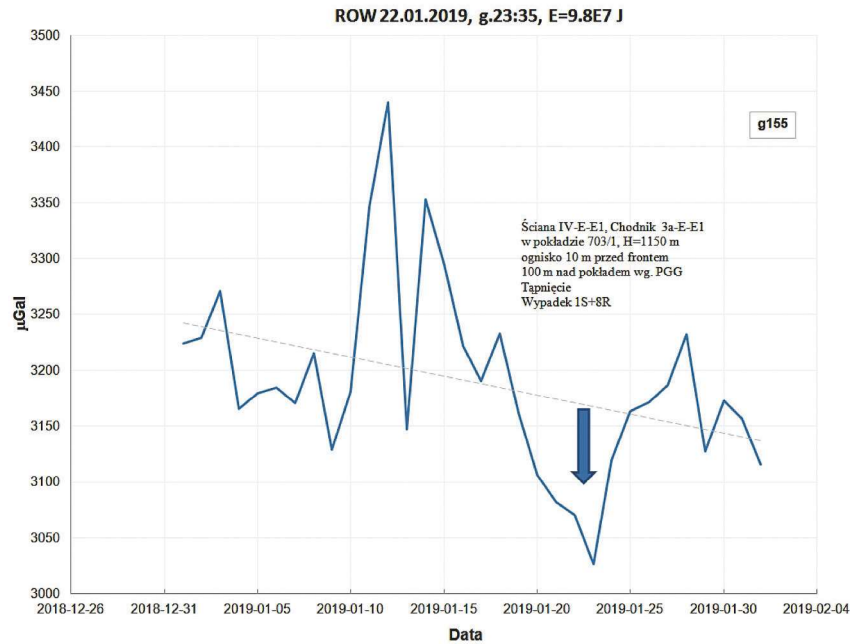
Pokład 703/1 o miąższości od 1,55 m do 2,30 m i nachyleniu od 0° do 5° , w rejonie E-E1 zaliczony został do II stopnia zagrożenia tąpnięciami, IV kategorii zagrożenia metanowego, klasy B zagrożenia wybuchem pyłu węglowego i I stopnia zagrożenia wodnego. Bezpośrednio w stropie pokładu 703/1 zalega warstwa łupku ilastego zmiennie zapiaszczonego o grubości 8 m, a następnie piaskowiec drobnoziarnisty o grubości 14 m, łupek piaszczysty o grubości 14,5 m oraz naprzemianległe warstwy piaskowców drobnoziarnistych, iłowców oraz mułowców. W odległości 62 m nad pokładem 703/1 zalega warstwa łupku piaszczystego o grubości 55 m, a w spągu łupek ilasty o różnym stopniu zapiaszczenia, przechodzący w łupek piaszczysty, lokalnie w piaskowiec. Za przyczynę tąpnięcia uznano wystąpienie samoistnego wstrząsu górotworu o energii $9,8 \times 10^7$ J, zaistniałego na skutek nagłego wyładowania energii skumulowanej w górotworze (www.wug.gov.pl).

W wyniku wstrząsu dziewięciu pracowników zatrudnionych w ścianie uległo wypadkom, w tym górnik przodowy wypadkowi śmiertelnemu w rejonie sekcji obudowy zmechanizowanej nr 130 oraz 8 pracowników wypadkom powodujących czasową niezdolność do pracy. Czujniki metanometrii automatycznej bezpośrednio po wstrząsie zarejestrowały wzrost zawartości metanu. Czujnik zabudowany w chodniku 3a-E-E1 badawczym przed stacją transformatorową zarejestrował maksymalną zawartość metanu wynoszącą 7%. Anemometr zabudowany w chodniku 4-E-E1 zarejestrował chwilowe odwrócenie prądu powietrza, a następnie



Rys. 5. Wykres wartości g zarejestrowanych w kolejnych dniach roku 2019 na stanowisku w Rybniku -Niewiadomiu o północy. Kropkami zaznaczono czas i magnitudę wysokoenergetycznych wstrząsów górniczych, które wystąpiły w tym czasie na terenie GZW (www.grss.gig.eu)

Fig. 5. Graph of g values recorded in the following days of 2019 at the site in Rybnik -Niewiadom at midnight. Dots indicate the time and magnitude of high-energy mining induced tremors that occurred at that time in the area of the Upper Silesian Coal Basin (www.grss.gig.eu)



Rys. 6. Wykres wartości g zarejestrowanych o północy (godzina 00:00:00) w okresie czasu od 01.01.2019 do 01.02.2019 przez grawimetr gPhoneX g_{155} na stanowisku w Rybniku. W okresie tym w dniu 22.01.2019 wystąpił wstrząs o magnitudzie lokalnej $M=3.4$, który spowodował tąpnięcie w ścianie IV-E-E1 i chodniku 3a-E-E1 badawczym w pokładzie 703/1 na poziomie 1150 m oraz wypadek zbiorowy w tej ścianie

Fig. 6. Graph of g values recorded at midnight (00:00:00) in the period from 01/01/2019 to 01/02/2019 by the gPhoneX g_{155} gravimeter at the position in Rybnik. During this period, on January 22, 2019, a local magnitude $M = 3.4$ earthquake occurred, which caused a rock burst in longwall IV-E-E1 and research gallery 3a-E-E1 in seam 703/1 at the level of 1150 m, and a mass accident in this longwall

ustabilizował się na wartości średniej prędkości powietrza wynoszącej 0,5 m/s. Przed wstrząsem wskazywał około 1,7 m/s (www.wug.gov.pl).

Zmiany pola grawitacji w styczniu 2019 roku, jako wykresy wartości rejestrowanych o północy każdej doby przedstawiono na rysunku 6. Widać na nim wyraźne obniżanie wartości pola siły ciężkości na stanowisku g_{155} w okresie 11 dni poprzedzających tąpnięcie.

Zmiany pola grawitacji w okresie od 10.01.2019 do 26.01.2019 roku zarejestrowane przez grawimetr g_{155} uwiarygodnione są na rys.7. Dla ilustracji, jak się one różnią od powszechnie stosowanego modelu teoretycznego do obliczania przebiegu pływów grawitacyjnych EG TAB, w górnej części rysunku przedstawiono wykres teoretycznych wartości obliczonych dla stanowiska grawimetru w Zabytkowej Kopalni Ignacy w Rybniku (Timmen et al. 1995; Micro-g LaCoste 2013b). Wstrząsy górnicze zarejestrowane w analizowanym przedziale czasu przez ten instrument widoczne są w dolnej części rysunku w postaci pionowych linii. Wstrząs, który spowodował tąpnięcie w dniu 22.01.2019 (przed północą) widoczny jest w końcowej części rysunku. Należy zwrócić uwagę na różnicę zakresów zmian wartości amplitudy teoretycznych (górną część rysunku) i pomiarowych (dolna część rysunku) fal pływowych.

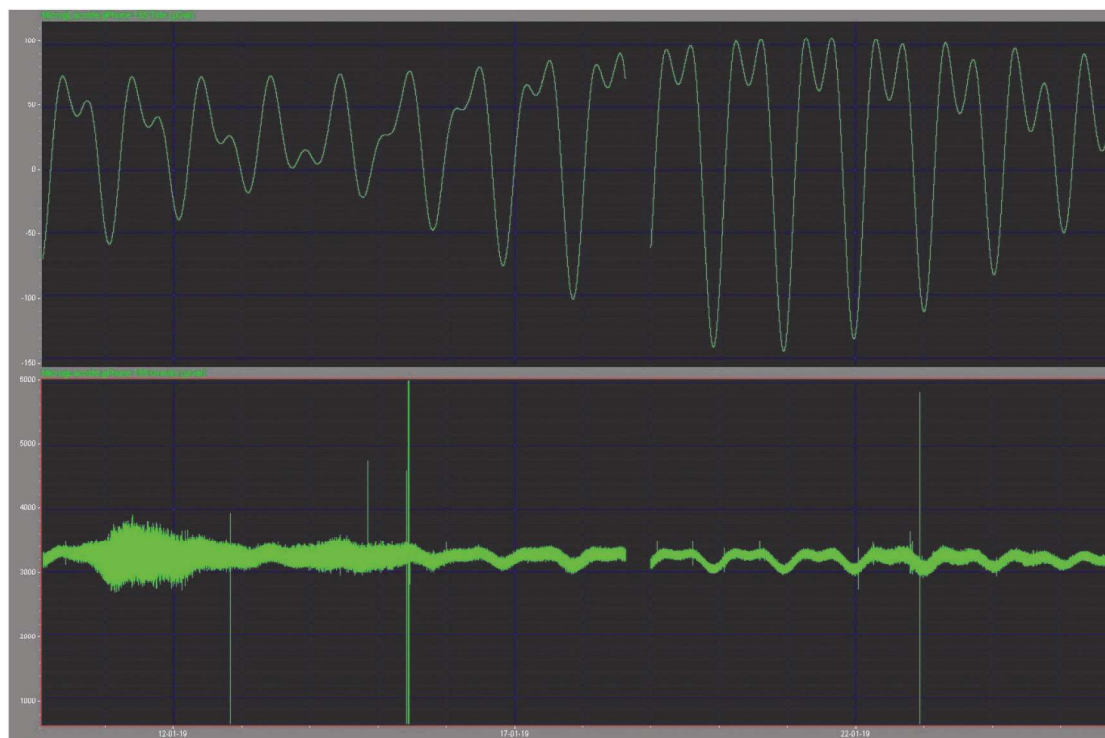
Analiza zmienności przedstawionych na rysunkach 6 i 7 danych z pomiarów grawimetrycznych prowadzi do następujących spostrzeżeń:

- po przejściu fali pływowej o relatywnie dużej amplitudzie w okresie od 10.01.2019–13.01.2019 w rejonie stanowiska pomiarowego wystąpiło 5 silnych energetycznie wstrząsów górotworu,

- wstrząs, który spowodował tąpnięcie wystąpił ok. 11 dni po zarejestrowaniu przez grawimetr pływowych oscylacji pola grawitacji o bardzo dużej amplitudzie. Zmiany te są widoczne zarówno w przypadku analizy zbioru wartości dobowych g (rys. 4) z tego okresu, jak i zbioru wartości 1-sekundowych. O ile w przypadku zbioru wartości dobowych amplituda zmian pola w okresie poprzedzającym tąpnięcie spada o ok. 400 mGala, to w przypadku zbioru wartości 1-sekundowych maksymalna amplituda oscylacji wynosi ok. 1000 mGala, która została zarejestrowana w dniu 11.01.2019. Bezpośrednio w okresie poprzedzającym tąpnięcie grawimetr g_{155} zarejestrował 10 wstrząsów górotworu, których amplituda wartości g na rejestracjach była znacznie mniejsza aniżeli amplituda pływów litosferycznych,
- rzeczywiste oscylacje pola siły ciężkości w analizowanym okresie czasu znacznie odbiegają od obliczonych teoretycznie dla modelu EG TAB. Maksymalne zmiany pola grawitacji wystąpiły w dniu 11.01.2019 (1000 mGala), w którym teoretycznie powinny być o jeden rząd niższe (120) mGala.

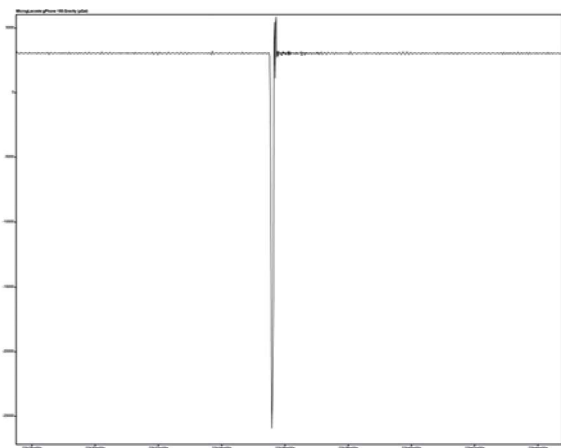
Wstrząs, który spowodował tąpnięcie zarejestrował się na krzywej zmian g jako wyraźne, krótkotrwałe obniżenie wartości pola siły ciężkości o amplitudzie ok. 28 000 mGali (rys.8).

Zapisał się na wykresie g jako bardzo nieregularny sygnał sinusoidalny. W jego pierwszej fazie obejmującym pół okresu fali wartość g znacznie maleje. Następnie sygnał przechodzi w regularne drgania harmoniczne o zmniejszającej się amplitudzie i czasie trwania ok. 2 minut. Zmiana g obserwowana w pierwszej fazie rejestracji jest wskaźnikiem obniżenia się gęstości przestrzennej górotworu w obszarze źródłowym



Rys. 7. Wykresy amplitudy pływów litosferycznych obliczonych wg modelu ETGTAB (górna część rysunku) oraz pomierzonych w okresie od 10.01.2019 - 26.01.2019 w 1-sekundowych odcinkach czasu przez gravimetr g_{155} wraz sygnałami od wstrząsów (dolna część rysunku)

Fig. 7. Graphs of the amplitude of lithospheric tides calculated according to ETGTAB model (upper part of the figure) and measured in the period from 01/10/2019 to 01/26/2019 in 1-second intervals by the g_{155} gravimeter together with shock signals (bottom part of the figure)



Rys. 8. Zapis wstrząsu w momencie tąpnięcia w KWK ROW w dniu 22.01.2019 przez system gravimetru g_{155} .

Fig. 8. Record of the shock at the moment of rock burst in KWK ROW on January 22, 2019 by the g_{155} gravimeter system

wstrząsu w wyniku redukcji naprężeń w górotworze na przedpolu frontu ścianowego. Za wymiar tego obszaru należy przyjmować wartość szerokości niecki osiadania nad ścianą węglową, gdyż w takim obszarze zachodzą odkształcenia górotworu, wywołane eksploatacją. W aspekcie mechaniki, w wyniku takiego procesu następuje odprężenie górotworu w strefie od głębokości zalegania eksploatowanego pokładu

do powierzchni terenu.

7. Wstępna grawimetryczna skala intensywności wstrząsów

Gravimetr g_{phoneX} z platformą samopoziomującą mierzy i rejestruje wartości zmian składowej pionowej przyspieszenia ziemskiego, które nie są porównywalne z wartościami przyspieszenia mierzonymi sejsmometrami. Z tego względu, aby dane te można było wykorzystać do oceny energii i oddziaływania na środowisko konieczne jest ich skalowanie na podstawie danych zarejestrowanych tradycyjnymi czujnikami stosowanymi w sejsmologii górniczej (akcelerometry, geofony, sejsmometry). Na podstawie analizy korelacyjnej zbiorów danych sejsmologicznych i grawimetrycznych można określić empiryczne związki pomiędzy nimi oraz wykorzystywać je do oceny wpływu na obiekty powierzchniowe i ludzi w analogii do skal sejsmicznych (Mutke i in. 2015 Mutke, Dubiński 2016; Mutke 2018).

Do opracowania wstępnej, grawimetrycznej skali intensywności wstrząsów sejsmicznych wykorzystano udostępniony przez PGG S.A. zbiór danych o wysokoenergetycznych wstrząsach, które zarejestrowano w trakcie prowadzenia ściany IV-N-W1 w pokładzie węgla 713/1-2 zalegającym na głębokości ok. 1100 m, w odległości ok. 3 km od stacji pomiarowej g_{155} . Położenie ognisk wstrząsów względem stanowiska gravimetru uwidoczniono na rys. 9.

Zbiór zarejestrowanych przez kopalnianą sieć sejsmologiczną obejmuje 41 wstrząsów. Odległości hypocentralne od tych wstrząsów zmieniały się w przedziale od 2.9-3.3 km. Natomiast ich energia zmieniała się w przedziale od $2+E5$



Rys.9. Lokalizacja grawimetru g_{155} oraz wstrząsów górniczych na mapie sytuacyjnej rejonu w ZG Rydułtowy

Fig. 9. Locations of the g_{155} gravimeter and mining induced tremors on the situational map of the area at mine Rydułtowy

do $7.7 \cdot 10^6$ J ($M=1.8 - 2.7$). Zdecydowana większość z nich miała relatywnie małą energię w przedziale od $1 \cdot 10^5$ do $3 \cdot 10^6$ J. Tylko 1 wstrząs miał energię większą od $1 \cdot 10^7$ J.

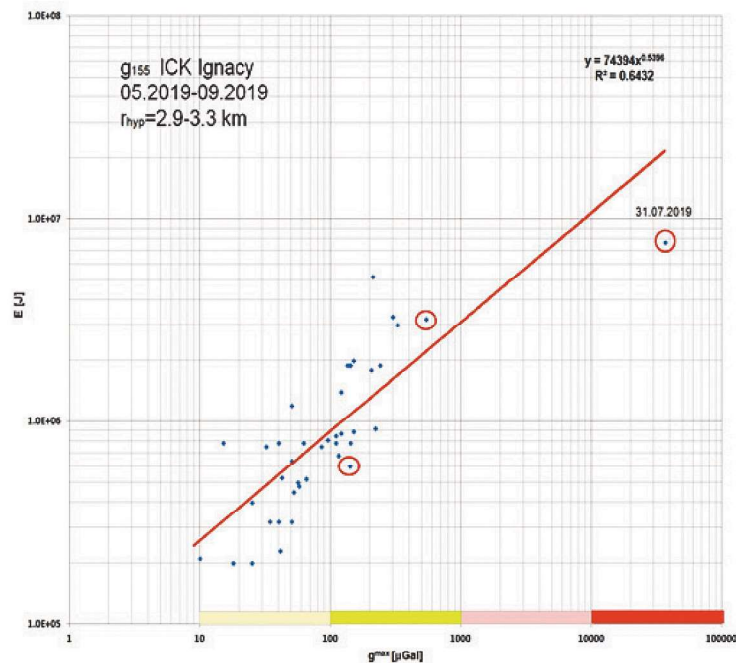
Zależność pomiędzy maksymalnymi wartościami zmiany natężenia pola siły ciężkości dg , a energią wstrząsów przedstawiono na rys. 10.

Najlepsze dopasowanie porównywanych wielkości uzyskuje się przyjmując dla linii korelacji wzór potęgowy w postaci (4). Może być on wykorzystany do szacowania intensywności wstrząsów górniczych w skali obszaru 1 kopalni

z wartości maksymalnej amplitudy sygnałów g_{max} zarejestrowanych grawimetrem pływowym z platformą samopoziomującą. We wzorze tym jednostkami energii E są joule [J], a amplitudy zmiany pola siły ciężkości - mikrogale [mGal].

$$E = 74394 g_{max}^{0.5396} \quad (4)$$

Zależność pomiędzy amplitudą sygnałów (g_{max}) generowanych wstrząsami górotworu a odległością epicentralną



Rys. 10. Zależność pomiędzy energią silnych wstrząsów sejsmicznych a maksymalną amplitudą przyspieszenia ziemskiego g zarejestrowanego grawimetrem g_{155} z platformą samopoziomującą

Fig. 10. The relationship between the energy of strong mining induced tremors and the maximum amplitude of the gravitational acceleration g recorded with the g_{155} gravimeter with a self-levelling platform

od źródła wstrząsu (r). W GZW była ona przedmiotem analizy zbiorów danych o energii i lokalizacji wstrząsów zarchiwizowanych w katalogach Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej (GRSS) i sieci grawimetrycznej GOG z lat 2018-2019 (Kotyrbą i in. 2020). Najlepsze dopasowanie otrzymano dla wzoru (5). Zależność ta uwzględnia tłumienie sygnałów wraz ze wzrostem odległości d od źródła wstrząsu. Wartości d wyrażone są w kilometrach, a g w mikrogalach (rys.11).

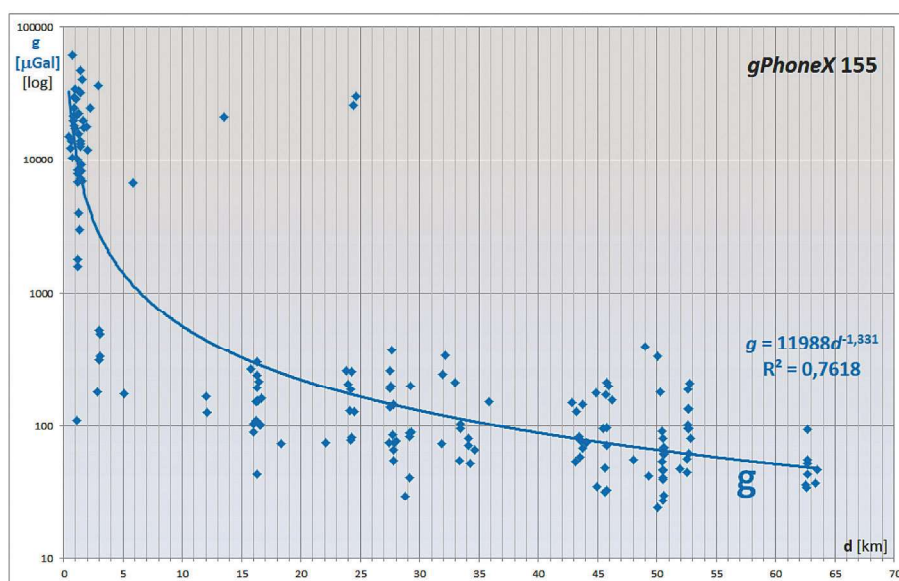
$$g^{max} = 11988d^{-1.331} \quad (5)$$

Na tej podstawie można wprowadzić pięciostopniową stopniową grawimetryczną skalę intensywności wstrząsów w rejonie stacji pomiarowej w Rybniku - Niewiadomiu przedstawioną w tabeli 1. Pozwala ona szacować odczuwalność wstrząsów górotworu na powierzchni terenu na podstawie wartości maksymalnej amplitudy sygnałów grawimetrycznych (www.gog.gig.eu).

W analizowanym zbiorze danych reprezentowane są jedynie rekordy pokrywające przedział energetyczny wstrząsów w stopniach od I do IV. Stopień V dodano na podstawie danych zarejestrowanych grawimetrem z innych rejonów kopalni ROW ZG Rydułtowy.

8. Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań wskazują, że systemy stacjonarnych pomiarów grawimetrycznych dostarczają cennych danych o długo i krótkookresowych procesach dynamicznych zachodzących w górotworze, w którym prowadzona jest podziemna eksploatacja kopalni. W szczególności takim systemem jest grawimetr gPhoneX z platformą samopoziomującą. Zarejestrowane sygnały bardzo dobrze obrazują zarówno krótkotrwałe jak długotrwałe ruchy podłoża wywołane drganiami od wstrząsów sejsmicznych i pływami litosfery. Dodatkowe rejestracje z czujników poziomu systemu pozwalają na rozróżnienie źródeł ruchu podłoża (fala sejsmiczna, fala pływowa) w danym punkcie obserwacyjnym. W grawimetrycznych zapisach wstrząsów górotworu, w strefie epicentralnej ruch podłoża jest superpozycją ruchu translacyjnego i rotacyjnego. Z tego względu dane pomiarowe z grawimetrów pływowych są dobrym uzupełnieniem obserwacji prowadzonych systemami sejsmologicznymi, w których czujnikami ruchu są akcelerometry, geofony, a także złożone z tych czujników systemy pomiaru rotacji (Łogiewa i in. 2018). Dostarczają one nowych danych, które można wykorzystać do kompleksowej oceny zagrożenia sejsmicznego w kopalniach, uwzględniając czynniki klimatyczne i geodynamiczne, a także ustalanie genezy deformacji wyrobisk górniczych i tąpnięć w kopalniach podziemnych.



Rys. 11. Zależność pomiędzy maksymalną amplitudą sygnałów grawimetrycznych a odległością epicentralną od źródła wstrząsu

Fig. 11. Relationship between the maximum amplitude of gravimetric signals and the epicentral distance from the shock source

Tabela 1. Grawimetryczna skala intensywności wstrząsów pochodzenia górniczego dla KWK ROW ZG Rydułtowy
Table . 1. Gravimetric scale of mining induced tremors intensity for coal mine ROW – ZG Rydułtowy

Stopień	Energia [J]	Magnituda [M]	Amplituda zmiany przyspieszenia ziemskiego g^{max} [μ Gal]	Oddziaływanie na środowisko
I	1-9E+5	1.8-2.1	1-100	nieodczuwalne
II	1-5E+6	2.1-2.5	101-1000	słabo odczuwalne
III	5-9E+6	2.5-2.7	1001-10000	średnio odczuwalne
IV	1- 9.9E+7	2.7-3.0	10001-70000	silnie odczuwalne
V	>1E+8	>3	>70000	b. silnie odczuwalne

Mając na uwadze duże znaczenie dla bezpieczeństwa pracy w podziemnych kopalniach węgla na terenie Górnego Śląska, Zakład Geologii i Geofizyki Głównego Instytutu Górniczego udostępnia dane kanału pomiarowego „g” z grawimetrów pływowych zainstalowanych w Katowicach (GIG) i Rybniku (Zabytkowa Kopalnia Ignacy) w aplikacji internetowej na witrynie www.gog.gig.eu. Dane te mogą być wykorzystane przez Działy Tapań kopalń węgla kamiennego jako pomocnicze w bieżącej ocenie i monitorowaniu zagrożenia sejsmicznego z uwzględnieniem okresowych obciążeń górotworu ekstremalnie dużymi pod względem amplitudy pływami litosfery genezy klimatycznej.

Informacja o źródle finansowania:

Niniejsza praca została zrealizowana z wykorzystaniem danych pozyskanych w wyniku realizacji projektu p.t. System Obserwacji Płyty Europejskiej o akronimie EPOS-PL, finansowanego w ramach działania 4.2 Programu Inteligentny Rozwój, współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego (ERDF), projekt numer: POIR.04.02.00-14-A003/16-00 oraz pracy o nr 11802010-124 sfinansowanej ze środków przyznanych na działalność statutową Głównego Instytutu Górniczego.

Podziękowania:

Autor publikacji pragnie podziękować Panu mgr. inż. Adamowi Barańskiemu z PGG S.A. za udostępnienie katalogu sejsmicznego z rejonu pierwszej ze ścian eksploatacyjnych w KWK ROW Ruch Rydułtowy.

Literatura

- BATTAGLIA M., GOTTSMAN J., CARBONE D., FERNANDEZ J. 2008 - 4D volcano gravimetry. *Geophysics* 73(6):WA3-WA18. <https://doi.org/10.1190/1.297779>.
- DARWIN H.G. 2009 - Oceanic tides and Lunar Disturbance of Gravity. Vol.1 Cambridge Library Collection.
- DEHANT V., DEFRAIGNE P., WAHR J.M. 1999 - Tides for a convective Earth. *Journal of Geophysical Research* vol. 104 no. B1, pp. 1035–1058.
- DOODSON A.T. 1921 - The harmonic development of the tide generating potential. *Proceeding Royal Society London A* 100, pp. 305-329.
- FAJKLEWICZ Z. 1981 - Pierwsze próby prognozowania wstrząsów górniczych metodą mikrogravimetryczną. „Przeгляд Górniczy”, nr 10 (517-525).
- FAJKLEWICZ Z. 1983 - Rock-burst forecasting and genetic research in coal-mines by microgravimetry method. *Geophysical Prospecting*, V.31, No 5 (748-765).
- FAJKLEWICZ Z. 2007 - Grawimetria stosowana. Wyd. AGH. Kraków.
- KOTYRBA A. 2014 - Czasowe zmiany pola siły ciężkości w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym i ich związek z eksploatacją górnictw. „Przeгляд Górniczy” nr 5, p.48-57.
- KOTYRBA A., KORTAS Ł. 2020 - Co-seismic signals of mining tremors in continuous recordings of gravity by gPhoneX tidal gravimeters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 129 (2020). [j.ijrmms.104288](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104288).
- KOTYRBA A., FROLIK A., KORTAS Ł., SIWEK S. 2020 - Grawimetryczno-hydrometryczny system monitoringu wstrząsów górniczych na Górnym Śląsku. „Przeгляд Geologiczny”, vol. 68, nr 11, <http://dx.doi.org/10.7306/2020.35>.
- KWIATEK J. 2002 - Obiekty budowlane na terenach górniczych. Główny Instytut Górniczy. Katowice.
- KOWALSKI A. 2020 - Deformacje powierzchni na terenach górniczych kopalń węgla kamiennego. Główny Instytut Górniczy. Katowice.
- LOGIEWA H., MUTKE G., LURKAA. 2018 - Sonda do pomiaru prędkości kątowej drgań rotacyjnych w podziemnych wyrobiskach kopalnianych. Preprint. ResearchGate.
- 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 Levelling 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.
- MUTKE G., CHODACKI J., MUSZYŃSKI L., KREMERS S., FRITSCHEN R. 2015 - Mining Seismic Instrumental Intensity Scale MSIS-15 – verification in coal basins. *Conference: AIMS 2015 - Fifth Int. Symp.: Mineral Resources and Mine Development. Aachen University At: Aachen University vol.14*, pp.551-560.
- MUTKE G., KOTYRBA A., LURKAA., OLSZEWSKAD., DYKOWSKI P., BORKOWSKIA., ARASZKIEWICZ A., BARAŃSKIA. 2019 - Upper Silesian Geophysical Observation System - a unit of the EPOS project. *Journal of Sustainable Mining. Vol.18, issue 4*, pp. 198-207.
- MUTKE G. 2018 - Zasady stosowania górniczej skali intensywności sejsmicznej GSIS-2017 do prognozy i oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją na obiekty budowlane oraz klasyfikacji ich odporności dynamicznej. Główny Instytut Górniczy. Seria: Instrukcje nr 23. Katowice.
- MUTKE G., LURKAA., ZEMBATY Z. 2020 - Prediction of rotational ground motion for mining-induced seismicity – Case study from Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Engineering Geology* 276:105767.
- NAWA K., SUGIHARA M. 2011 - Continuous gravity observations with gPhones and a CG-3M at Hachijo Island, Japan. *Proc. of 116th meeting, the Geodetic Society of Japan*, 18.
- NEUMEYER J. 2010 - Superconducting Gravimetry – chapter 10 in *Science of Geodesy-I. Advances and Future Directions* (red. Geochang Xu), Springer pp. 339-413.
- NIEBAUER T.M., MACQUEEN J., ALIOD D., FRANCIS O. 2011 - Monitoring earthquakes with gravity meters. *Geodesy and Geodynamics* 2(3):71-75.
- OLSON J.J., WARBURTON R.J. 1979 - Continuous gravity observations at the Geysers: a preliminary report. *GRC Transactions* 3, p.519-522.
- STEC K. 2007 - Aktywność sejsmiczna Górnośląskiego Zagłębia Węglowego - 30 lat ciągłej obserwacji przez Górnośląską Regionalną Sieć Sejsmologiczną. „Przeгляд Górniczy” nr 7-8/2007. Katowice, p.14-22.
- SIWEK S. 2021 - Study of the relationship of tidal changes in gravity with the time of mining tremors in the area of the mining longwall in a coal mine – case study in USCB, Poland,” *Journal of Sustainable Mining: Vol. 20 : Iss. 4 , Article 2*.
- SUGIHARA M., NAWAA K., NISHIA Y., ISHIDOA T., SOMA N. 2013 - Continuous gravity monitoring for CO₂ geo-sequestration. *Elsevier Energy Procedia* 37, p.4302–4309.
- TIMMEN L., WENZEL H-G. 1995 - *Worldwide Synthetic Gravity Tide Parameters*. Springer.
- www.gog.gig.eu
www.wug.gov.pl
www.emsc-csem.org
www.grss.gig.eu

Artykuł wpłynął do redakcji w styczniu 2022 r.
 Artykuł akceptowano do druku 28.02.2022 r.

Andrzej Kotyrba dr inż., absolwent Wydziału Geologiczno-Poszukiwawczego o specjalności geofizyka poszukiwawcza, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Jest zatrudniony w Głównym Instytucie Górniczym na stanowisku adiunkta i kierownika Laboratorium Geofizyki Inżynierskiej. Od roku 2003 prowadzi badania nad zmianami pola grawitacji powodowanymi przez eksploatację górnictw. a.kotyrba@gig.eu