



## ARTYKUŁY I KOMUNIKATY NAUKOWE

Grawimetryczno-hydrometryczny system monitoringu  
wstrząsów górniczych na Górnym ŚląskuAndrzej Kotyrba<sup>1</sup>, Adam Frolik<sup>1</sup>, Łukasz Kortas<sup>1</sup>, Sławomir Siwek<sup>1</sup>

A. Kotyrba

A. Frolik

Ł. Kortas

S. Siwek

**Gravimetric and hydrometric system for monitoring of mining tremors in Upper Silesia.** *Prz. Geol.*, 68: 833–842; doi: 10.7306/2020.35*Abstract.* The article presents the characteristics of the gravimetric and hydrometric system for observation of mining tremors in Upper Silesia. Individual system components were installed in the years 2018–2019 as part of the European Platform Observing System – Poland project with the acronym EPOS-PL, financed from the EU program – Intelligent Development. The system records the changes in gravitational acceleration and groundwater*level with a frequency of 1 Hz in the mining and post-mining areas. The analysis of the measurement data collected allows evaluating the sensitivity of the system and the possibilities of its use in the mining seismicity studies in Upper Silesia, as well as monitoring rock mass movements under the influence of seismic and geodynamic phenomena in other parts of the world.***Keywords:** gravity, groundwater, mining, tremors, monitoring

Obserwowany w ostatnich 20 latach szybki rozwój satelitarnych technik pomiaru własności atmo-, hydro- i litosfery Ziemi nie ominął sposobu pomiaru pola siły ciężkości. Stał się on przedmiotem intensywnych badań, których celem jest lepsze poznanie skorupy ziemskiej, procesów dynamicznych w niej zachodzących oraz ich wpływu na klimat. Przełomowe dla tej dziedziny badań kosmicznych były projekty amerykańskiej Narodowej Agencji Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) o akronimie GRACE – *Gravity Recovery and Climate Experiment* (lata 2002–2017) oraz Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) o akronimie GOCE – *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer* (2009–2013). W projekcie GRACE zastosowano technikę precyzyjnego pomiaru odległości dwóch bliźniaczych satelitów krążących w odległości ok. 220 km od siebie po okołobiegunowej orbicie Ziemi określonej przez apogeum i perygeum (odpowiednio 508 i 480 km) i podlegających zjawisku perturbacji w polu siły ciężkości. W programie Europejskiej Agencji Kosmicznej wykorzystano specjalnie skonstruowany dla projektu gradientometr umożliwiający pomiar trzech składowych gradientu pola siły ciężkości w układzie ortogonalnym ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). W gradientometrze sensorami zmian pola są trzy pary akcelerometrów o wysokiej czułości (Rummel i in., 2011).

Pomiary technikami i instrumentami satelitarnymi dostarczają ogromnej ilości dokładnych danych opisujących ziemskie pole siły ciężkości i jego zmiany w przestrzeni i czasie. Mogą one być zastosowane do wielu różnych celów, co ilustrowano na rycinie 1 (geodezja – ESA/HPF/DLR) i rycinie 2 (sejsmologia – DGFI/TU Delft), prezen-

tujących przykładowe wykorzystanie danych otrzymanych z pomiarów satelitarnych ziemskiego pola siły ciężkości.

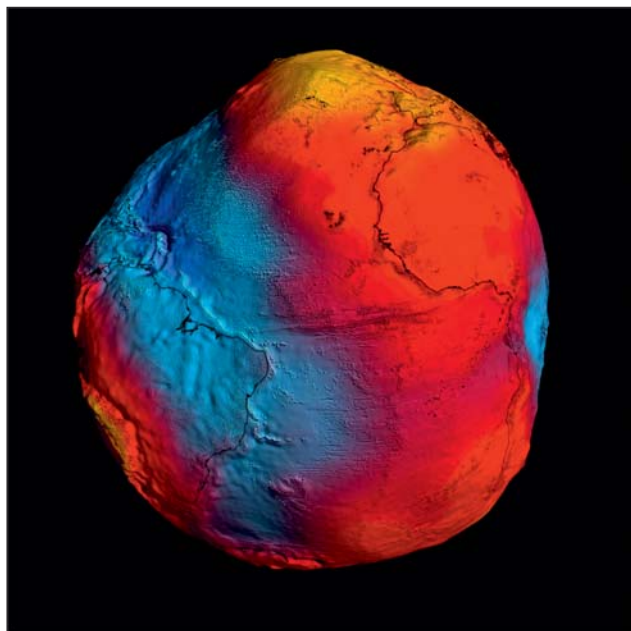
W aspekcie potencjalnego wykorzystania wyników pracy szczególnie interesujący jest przykład z ryciny 2, który wskazuje, że w odległości ok. 300 km od Ziemi można zmierzyć wpływ zmian rozkładu masy w skorupie ziemskiej na skutek wystąpienia wstrząsu sejsmicznego w polu drugich pochodnych potencjału siły ciężkości ( $W_{zz}$ ). Wartości opisujące to pole maleją odwrotnie proporcjonalnie do trzeciej potęgi odległości satelity od środka kuli ziemskiej. Tensor drugich pochodnych potencjału siły ciężkości jest odpowiednikiem tensora naprężeń stosowanego w opisie mechanizmu wstrząsów sejsmicznych (Fajkiewicz, 1980, 2007; Jacoby, Smilde, 2009). Jeżeli takie zmiany pola są rejestrowane pomiarami satelitarnymi, to tym bardziej są mierzalne na powierzchni ziemi technikami lądowymi.

Wyniki obserwacji satelitarnych stały się inspiracją do zaprojektowania systemu ciągłych obserwacji zmian pola grawitacji i poziomu wód podziemnych na terenach Górnego Śląska, wspomagającego obserwacje sejsmologiczne prowadzone przez Główny Instytut Górnictwa (GIG) oraz położone w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW) kopalnie węgla kamiennego (Mutke i in., 2019). System obserwacji grawimetryczno-hydrometrycznych osiągnął pełną gotowość operacyjną w kwietniu 2019 r. Dane z tego systemu są przekazywane do Lokalnego Centrum Danych Geofizycznych (LCDG) w GIG, gdzie są archiwizowane i katalogowane. Wstrząsy górnicze są identyfikowane na rejestracjach grawimetryczno-hydrometrycznych na podstawie wykazanych zdarzeń sejsmicznych z sieci GRSS

<sup>1</sup> Zakład Geologii i Geofizyki, Główny Instytut Górnictwa, 40-166 Katowice, plac Gwarków 1; akotyryba@gig.eu; afrolik@gig.eu; lkortas@gig.eu; ssiwek@gig.eu

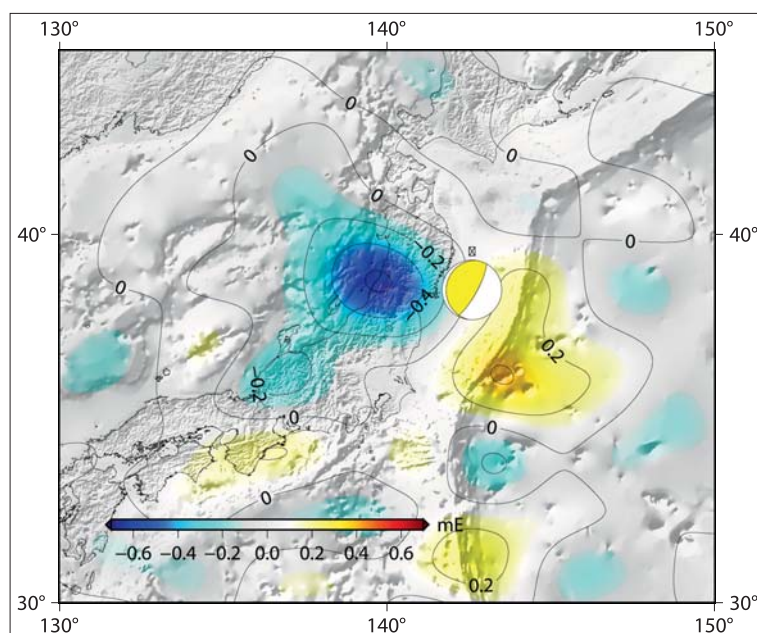
(www.grss.gig.eu). Odpowiadające im parametry sygnałów sejsmo-grawimetrycznych i sejsmo-hydrometrycznych są katalogowane w miesięcznych okresach czasu.

Celem artykułu jest charakterystyka możliwości metrologicznych nowego systemu obserwacji zjawisk geodynamicznych związanych z wstrząsami górniczymi w kopalniach węgla kamiennego. Monitoringowe obserwacje



**Ryc. 1.** Odzworowanie odchylek rzeczywistej powierzchni wód w morzach i oceanach od modelu geoidy ekwipotencjalnej pomiarami satelitarnymi wykonanymi w ramach misji kosmicznej GOCE. Kolorami oznaczono wartości odchyłki tej powierzchni od modelu geoidy w przedziale od  $-100$  do  $100$  m (odpowiednio odcienie koloru niebieskiego i czerwonego/żółtego) (www.esa.eu)

**Fig. 1.** The deviations of the actual surface of the water in seas and oceans from the model of equipotential geoid by the satellite measurements obtained as a part of the GOCE space mission. Colour indicates the deviation from the geoid in the range from  $-100$  to  $100$  m (shades of blue and red/yellow, respectively) (www.esa.eu)



←

**Ryc. 2.** Zmiany pionowego gradientu ziemskiego pola siły ciężkości na skutek trzęsienia Ziemi w Japonii z dn. 11 marca 2011 r., określone na podstawie danych różnicowych z misji kosmicznych ESA (GOCE) i amerykańsko-niemieckiego satelity Grace. Skala w mili etweszach ( $1\text{mE} = 10^{-12} \text{s}^{-2}$ ). Okrąg wskazuje epicentrum wstrząsu (www.dgfi/tu.eu)

**Fig. 2.** Changes in the vertical gradient of the Earth's gravity field due to the earthquake in Japan on March 11, 2011, determined on the basis of differential data from ESA space missions (GOCE) and the American-German Grace satellite. Scale in millietwesch (  $1\text{mE} = 10^{-12} \text{s}^{-2}$  ). The circle indicates the shock's epicenter (www.dgfi/tu.eu)

pola grawitacji ziemskiej i wód podziemnych uzupełniają obserwacje seismologiczne i mogą być wykorzystane w problematyce oceny zagrożenia wyrobisk podziemnych kopalń węgla kamiennego zjawiskami dynamicznymi takimi jak tąpnięcia i wyrzuty skał.

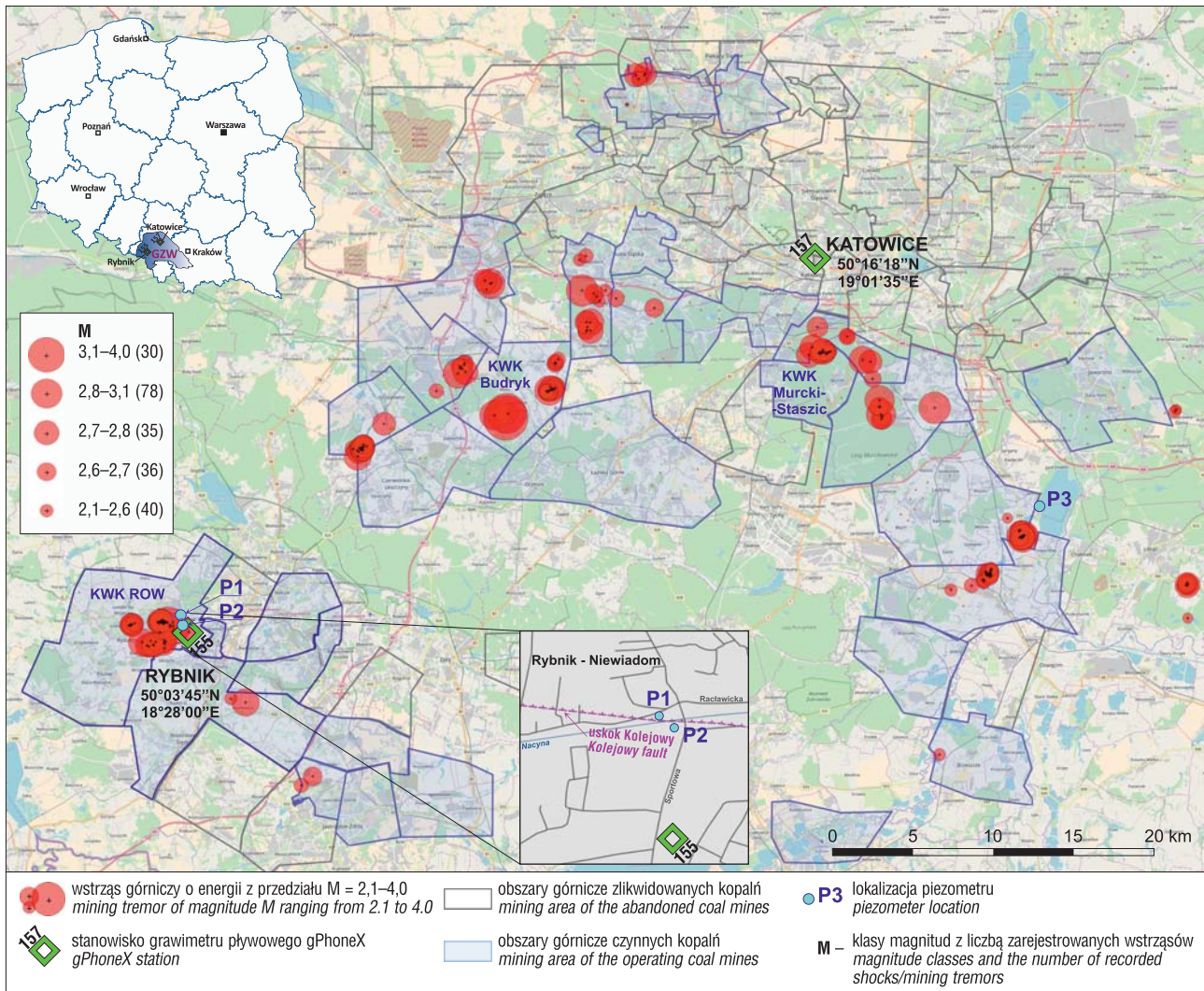
## CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU OBSERWACJI GRAWIMETRYCZNYCH

Współczesne grawimetry lądowe pozwalają na pomiar składowej pionowej ziemskiego pola siły ciężkości z częstotliwością większą od  $1$  Hz. Z tego względu mogły znaleźć zastosowanie w seismologii (Nawa, Sugihara, 2011; Niebauer i in., 2011). Pierwszy z elementów grawimetryczno-hydrometrycznego systemu monitoringu wstrząsów górniczych na terenie GZW stanowi układ dwóch grawimetrów pływowych gPhoneX firmy Micro-g LaCoste (USA) o numerach seryjnych 155 i 157, umożliwiające obserwację zmian w polu siły ciężkości na terenach górniczych i pogórnicych (Kotyrbka, Kortas, 2020, Kortas, 2020). Urządzenia te, zakupione przez GIG i uruchomione 30 października 2018 r. w ramach projektu *European Plate Observing System – Poland* (EPOS-PL) współfinansowanego przez UE, były pierwszymi w Polsce grawimetrami tego typu. W projekcie EPOS-PL grawimetry zostały zintegrowane z sieciami satelitarnych obserwacji geodezyjnych GNSS oraz InSAR w systemie *Global Geodetic Observing System* (GGOS-PL++) (Sońnica i in., 2018).

Wzajemna odległość grawimetrów, w linii której azymut wynosi  $59,53^\circ$ , to  $46,16$  km. Położenie stacji 155 i 157 na tle mapy sytuacyjnej obrazującej rozkład czynnych i zlikwidowanych kopalń w obrębie GZW przedstawiono na rycinie 3, na której zaprezentowano również rozkład epicentrow 219 wstrząsów górniczych o magnitudach  $M = 2,1-4,0$ , zarejestrowanych przez sieć GRSS (www.grss.gig.eu), oraz grawimetry pływowe w okresie 1.11.2018–1.05.2020 r.

Zadaniem grawimetrycznego systemu monitoringu wstrząsów jest ciągła rejestracja zmian składowej pionowej przyspieszenia siły ciężkości ( $g$ ) w czasie w jednostkach mikro Gal [ $\mu\text{Gal}$ ] ( $1 \text{ Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ) z częstotliwością  $1$  Hz. Poprzez całkowanie krzywej zmian  $g$  otrzymuje się dodatkowe parametry w postaci wartości amplitudy składowej pionowej prędkości drgań  $V$  oraz amplitudy





**Ryc. 3.** Lokalizacja elementów systemu monitoringu gravimetryczno-hydrometrycznego wraz z epicentrami wstrząsów górniczych zarejestrowanych w okresie 1.11.2018–1.05.2020 r. na tle aktywnych i zlikwidowanych obszarów górniczych w GZW

**Fig. 3.** Location of elements of the gravimetric-hydrometric monitoring system together with the epicentre of shocks recorded in the period 1.11.2018–1.05.2020 against the background of active and abandoned mining areas in the USCZB

składowej pionowej przemieszczenia podłoża  $P$ . Jednostkami prędkości są mikrony ( $10^{-6}$  m) na sekundę [ $\mu/s$ ], a przemieszczenia pionowe mikrony [ $\mu$ ]. Szeregi czasowe zmian  $g$ ,  $V$ ,  $P$  wykorzystywane w monitoringu wstrząsów górniczych są zapisywane w dobowych plikach danych o binarnym BIN (częstotliwość próbkowania 5 Hz) i tekstowym TSF (częstotliwość próbkowania 1 Hz) formacie (Micro-g LaCoste, 2013b). Dane w pliku tekstowym TSF są tworzone przez uśrednienie wartości rejestrowanych z częstotliwością 5 Hz

Na pojedyncze stanowisko pomiarowe gPhoneX składają się trzy główne elementy: układ pomiarowy z czujnikiem zmian przyspieszenia siły ciężkości 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 akwizycji danych poprzez program gMonitor (Micro-g LaCoste, 2013b). Producent systemu określa rozdzielczość pracy aparatury gPhoneX na  $0,1 \mu\text{Gal}$ , precyzję odczytu na  $1 \mu\text{Gal}$ , a całkowity szum systemu na maksymalnie  $0,45 \text{ mGal}/\text{Hz}^{1/2}$  (Micro-g LaCoste, 2013a). Dryft urządzenia nie powinien przekraczać

$1,5 \text{ mGal}/\text{miesiąc}$  i zwykle wynosi  $<500 \mu\text{Gal}/\text{mies}$ . Gravitometry gPhoneX 155 i 157 znajdują się obecnie w fazie końcowej stabilizacji dryftu, która trwa ok. dwóch lat (Micro-g LaCoste, 2013b).

Gravimetr gPhoneX nr 155 pracuje na betonowym postumencie o wymiarach  $1,1 \times 1,1$  m 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 ma głębokość ok. 1,2 m i jest posadowiony bezpośrednio na piaskowcu karbońskim. Eksploatacja węgla jest prowadzona systemem ścianowym w odległości 0,0–2,5 km od stanowiska pomiarowego przez kopalnię ROW na głębokości ok. 1000 m w pokładach nr 700, 703, 706, 713/12, 714 w obrębie serii warstw jaskłowieckich górnego karbonu.

Drugi gravimetr gPhoneX nr 157 jest zlokalizowany na analogicznym betonowym postumencie o wymiarach  $1,3 \times 1,3$  m w Górnośląskim Obserwatorium Geofizycznym (GOG), wchodzącym w skład kompleksu budynków GIG-u w Katowicach ( $50^{\circ}16'18''\text{N}$ ,  $19^{\circ}01'35''\text{E}$ ). GOG jest elementem Górnośląskiego Systemu Obserwacji Geofizycznych (GSOG) utworzonym w ramach wspomnianego wyżej projektu EPOS-PL (Mutke in., 2019). Postument o głębokości ok. 1,5 m jest również osadzony na piaskowcu

karbońskim. Zadaniem tego grawimetru jest rejestracja zmian  $g$  oraz parametrów pochodnych  $V$  i  $P$  na terenie, gdzie eksploatacja złóż surowców mineralnych (do ok. 4–5 km) została zakończona, a kopalnie zlikwidowano. Najbliższą kopalnią węgla kamiennego prowadzącą eksploatację generującą wstrząsy sejsmiczne w rejonie tego stanowiska jest KWK *Murcki-Staszic*, której granica obszaru górniczego jest zlokalizowana w odległości ok. 7 km (ryc. 3).

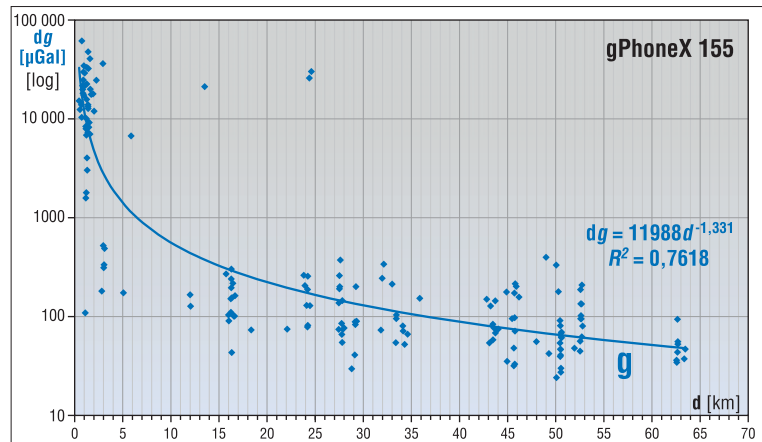
### Czułość systemu

Analiza dotychczas zarejestrowanych zdarzeń grawitacyjnych wywołanych wstrząsami górniczymi z okresu od uruchomienia systemu w dn. 1.11.2018 r. do 1.05.2020 r. pozwala ocenić, że możliwość rejestracji danego wstrząsu górniczego jest ściśle uzależniona od jego magnitudy (energii) oraz od odległości od elementu systemu (jednego z grawimetrów gPhoneX). Oba grawimetry rejestrują ruchy górotworu wywołane prawie wszystkimi wstrząsami górniczymi z rejonu GZW, a także dalekie, długotrwałe zdarzenia sejsmiczne, takie jak trzęsienia ziemi z obszaru całego globu. Nie wszystkie jednak wstrząsy są na tyle silne energetycznie i/lub nie wystąpiły dostatecznie blisko, aby mogły zostać wyodrębnione na rejestracjach z szumu tła, a tym samym stać się przedmiotem dalszej analizy. Amplituda szumu wartości  $g$  zwykle zmienia się w przedziale  $\pm 20$  Gal. Czasami zwiększa się ona do wartości maksymalnych  $\pm 100$  Gal. Dla parametrów pochodnych  $V$  i  $P$  przeciętne wartości amplitud szumu wynoszą  $\pm 0,2$  s i  $\pm 0,2$ , natomiast maksymalne  $\pm 1$  s dla  $V$  i  $\pm 1$  dla  $P$ . Na podstawie analizy dotychczas zgromadzonych danych można przyjąć, że identyfikowalne zdarzenia (w zapisach grawimetrów mają magnitudy od ok. 2,5–2,6, a amplitudy zmian  $g$  rzędu 150–200 Gal) i wystąpiły w odległości maksymalnie 20–22 km od stanowiska. Tak więc przy odległości pomiędzy grawimetrami przekraczającej 46 km słabsze energetycznie wstrząsy są wyraźnie widoczne na tle szumu tylko na jednym ze stanowisk, natomiast silniejsze zdarzenia ujawniają się w zapisach obu elementów systemu.

Zależności pomiędzy rejestrowanymi przez system zmiennymi a odległością epicentralną  $d$  są przedstawione na rycinach 4, 5 i 6, na przykładzie grawimetru nr 155 pracującego w Rybniku. Dzięki temu, że znajduje się on na terenie kopalni, która prowadzi bieżącą eksploatację, to może rejestrować zdarzenia z pełnego pola falowego zjawisk sejsmicznych, rejestrując wstrząsy górnicze, których epicentra znajdują się w odległościach praktycznie od 0 (pochodzące z KWK *ROW*) do przeszło 60 km (inne rejonu GZW).

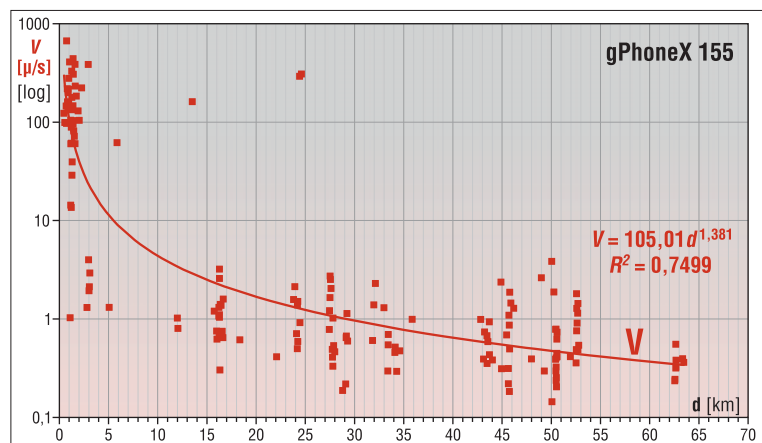
Zbiór danych dla tego urządzenia obejmuje parametry 170 zdarzeń z analizowanego okresu. W celu zobrazowania tłumienia amplitudy sygnałów grawitacyjnych opracowano zależność pomiędzy amplitudą zmian wartości maksymalnych

przyspieszenia siły ciężkości  $dg$  a odległością od stanowiska pomiarowego  $d$  przedstawioną na rycinie 4. Całkowanie 1-sekundowych szeregów czasowych przyspieszenia  $g$  pozwala przejść na szeregi czasowe pionowych



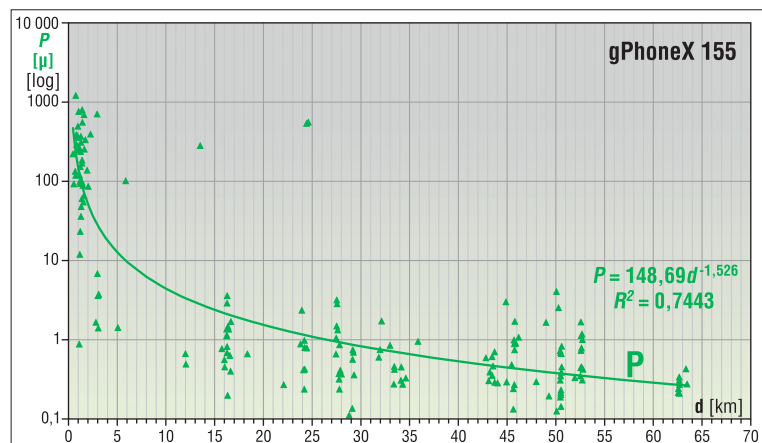
Ryc. 4. Zależność maksymalnej amplitudy przyspieszenia siły ciężkości  $dg$  od odległości epicentralnej  $d$  wstrząsu górniczego z okresu 1.11.2018–1.05.2020 r.

Fig. 4. Dependence of the maximum amplitude of gravitational acceleration  $g$  on the epicentral distance  $d$  of mining shock from the period 1.11.2018–1.05.2020



Ryc. 5. Zależność maksymalnej amplitudy prędkości drgań gruntu  $V$  od odległości epicentralnej  $d$  wstrząsu górniczego z okresu 1.11.2018–1.05.2020 r.

Fig. 5. The relationship between the maximum amplitude of the ground vibration velocity  $V$  and the epicentral distance  $d$  of mining shock from the period 1.11.2018–1.05.2020



Ryc. 6. Zależność maksymalnej amplitudy przemieszczenia pionowego  $P$  od odległości epicentralnej  $d$  wstrząsu górniczego z okresu 1.11.2018–1.05.2020 r.

Fig. 6. Dependence of the maximum vertical displacement amplitude  $P$  from the epicentral distance  $d$  of mining shock from the period 1.11.2018–1.05.2020



**Tab. 1.** Parametry najlepszego dopasowania w analizie regresji dla  $dg$ ,  $V$ ,  $P$ : równanie regresji, współczynnik determinacji oraz współczynnik zbieżności**Table 1.** Best fit parameters in regression analysis for  $dg$ ,  $V$ ,  $P$ : regression equation, determination factor, and convergence factor

Liczebność zbioru Number of events	Zmienna Variable	$dg$	$V$	$P$
170	równanie regresji regression equation	$11\,988 \cdot d^{-1,331}$	$105,01 \cdot d^{-1,381}$	$148,69 \cdot d^{-1,526}$
	$R^2$ [%]	76%	75%	74%
	$\phi^2 = 1 - R^2$ [%]	24%	25%	26%

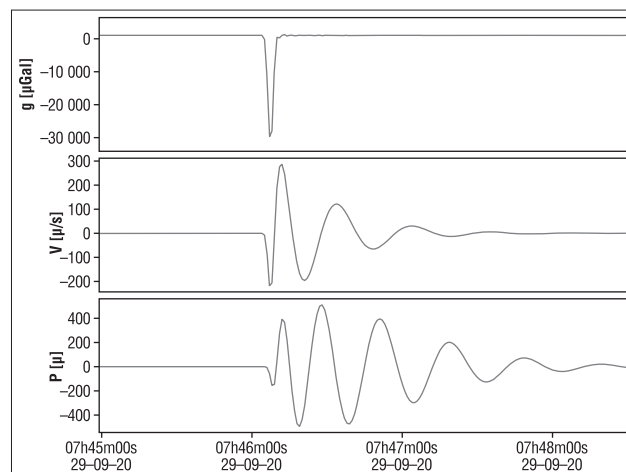
składowych prędkości  $V$  i przemieszczenia podłoża  $P$  w paśmie częstotliwości 0,0–0,5 Hz (Van Camp, Vauterin, 2005). Dla analizowanego zbioru danych zmienność wraz z odległością  $d$  parametrów pochodnych, tj. amplitudy maksymalnych zmian prędkości drgań  $V$  i maksymalnych przemieszczeń pionowych  $P$ , przedstawiono na rycinie 5 i 6.

W zależnościach tych zauważa się, że dla niektórych odległości liczba zdarzeń  $dg$ ,  $V$  i  $P$  jest większa niż dla innych. Wynika to z występowania wstrząsów w określonych rejonach, gdzie prowadzona jest eksploatacja. Rozrzut wartości tych parametrów dla tych samych odległości jest spowodowany zmienną energią wstrząsów. Przedstawione na rycinach 4–6 zależności funkcyjne pomiędzy wartościami  $dg$ ,  $V$ ,  $P$  a odległością epicentralną  $d$  analizowanych wstrząsów najlepiej aproksymują funkcje potęgowe  $f(x) = a \cdot x^b$ , których wzory wraz z wartością współczynnika determinacji  $R^2$  zamieszczono obok wykresu oraz w tabeli 1. Współczynnik ten jest miarą jakości dopasowania danych empirycznych do modelu i określa, jaki procent jednej zmiennej wyjaśnia zmienność drugiej. W tabeli 1 zamieszczono również procentowy format współczynnika determinacji oraz wartość współczynnika zbieżności  $\phi^2$ , który określa, jaka część wartości w zbiorze danych nie pasuje do modelu i/lub mieści się w błędzie.

Pomimo że analizuje się tylko dwuparametrową zależność (bez uwzględniania wielkości energii wstrząsu), uzyskane dopasowanie krzywej potęgowej oraz wartości  $R^2$  na poziomie 76% dla maksymalnych zmian  $g$  w zbiorze danych (ryc. 4) oznaczają, że zmiana przyspieszenia siły ciężkości jest silnie zdeterminowana odległością epicentralną  $d$ . Im mniejsza odległość wstrząsów od stanowiska grawimetru tym rejestrowany efekt grawitacyjny jest większy. Zależność ta maleje ze wzrostem odległości  $d$ .

Estymacja maksymalnych zmian  $V$  i  $P$  krzywą potęgową i wartości  $R^2$  rzędu 74–75%, podobnie jak w przypadku zmienności  $g$  oznaczają, że wielkości te ściśle zależą od odległości  $d$ . Dla 24–26% zdarzeń przyczyną zmian  $g$ ,  $V$ ,  $P$  należy wyjaśnić innymi czynnikami niż odległość wstrząsu od grawimetru. Są one najprawdopodobniej związane z lokalizacją stanowiska gPhoneX 155 w strefie epicentralnej zjawisk sejsmicznych, a krzywa regresji obejmuje również zjawiska położone w strefie dalekiej. Do głosu dochodzi tu zapewne anizotropia budowy geologicznej regionu, która jest przyczyną odmiennej odpowiedzi górotworu na przebieg fali sejsmicznej biegnącej od rozsianych na terenie GZW epicentrow wstrząsów do lokalizacji stanowiska pomiarowego, aniżeli tej pochodzącej od wstrząsów lokalnych (0,0–2,5 km).

Zależność statystyczną znacznie pogarszają dwa najsilniejsze zdarzenia sejsmiczne z analizowanego okresu o  $M = 3,8$  (z dn. 8.11.2018 r.,  $d = 24,61$  km) i 4,0 (z dn. 13.01.2020 r.,  $d = 24,43$  km) pochodzące z KWK *Budryk* (ryc. 3), których geneza może być powiązana nie tylko



**Ryc. 7.** Zapis zmian parametrów  $g$  (górn),  $V$  (środek) i  $P$  (dół) generowanych wstrząsem górniczym w strefie bliskiej  
**Fig. 7.** Record of changes in  $g$  (upper),  $V$  (middle) and  $P$  (lower) induced by mining tremor in a near source zone

z eksploatacją górniczą. Ponieważ wstrząsy w tym rejonie pochodzą z głębokości 2–6 km ([www.emsc-csem.org](http://www.emsc-csem.org)) ich mechanizm może być związany również z aktywnością granicy pomiędzy podłożem krystalicznym a skałami osadowymi, co zostało opisane na przykładzie innego wstrząsu z tego samego rejonu w pracy Kotyryby i Kortasa (2020). Po usunięciu tych dwóch zdarzeń ze zbioru danych współczynniki  $R^2$  osiągają wartości przekraczające 80%.

Chociaż amplitudy składowych pionowych prędkości i przemieszczenia to pod względem fizycznym zupełnie inne wielkości, to w analizowanym zbiorze zdarzeń zauważa się pewną prawidłowość wzajemnej relacji liczb je opisujących w zależności od odległości epicentralnej ogniska wstrząsu górniczego. Dla wszystkich zdarzeń grawitacyjnych maksymalna amplituda przemieszczenia pionowego osiąga nieco większe wartości w polu bliskim ( $d < 6$  km) niż maksymalna amplituda prędkości drgań (ryc. 5, 6). W polu średniego zasięgu ( $d = 6–12$  km) wartości tych parametrów zrównują się, a w falowym polu dalekim ( $d > 12$  km) sytuacja ta ulega odwróceniu. Wskazuje to, że w przedziale niskich częstotliwości drgań generowanych wstrząsami górniczymi istotne jest, który z parametrów opisujących ich intensywność wykorzystujemy do oceny wpływów dynamicznych w strefach bliskiej, średniej i dalekiej. Przykład zapisu parametrów  $g$ ,  $V$  i  $P$  spowodowanych wstrząsem górniczym o magnitudzie  $M = 3,3$  z dn. 29.10.2020 r. w strefie bliskiej, uzyskanego na grawimetrze pływowym gPhoneX-155, jest przedstawiony na rycinie 7.

Porównując wykresy poszczególnych parametrów, można zauważyć, że zmiany  $g$  liczbowo są o wiele większe aniżeli zmiany parametrów  $V$  i  $P$ .

## SYSTEM OBSERWACJI POZIOMU WÓD PODZIEMNYCH

Ruch wód podziemnych jest jednym z elementów środowiska geologicznego wykorzystywanym jako prekursor wstrząsów sejsmicznych (Wakita, 1975; Wang, Chia, 2008; Kopylova i in., 2019). Wody podziemne są także elementem wzmacniającym amplitudę drgań przy przechodzeniu fal sejsmicznych z masywu skalnego do gruntów nieskalistych (Kowalski, 1988). Możliwość ich monitoringu wykorzystania w problematyce sejsmologicznej pojawiła się wraz z opracowaniem urządzeń wykonujących pomiary z częstotliwością kilku herców [Hz].

Na drugi z elementów opisywanego grawimetryczno-hydrometrycznego systemu monitoringu wstrząsów górniczych składają się trzy piezometry wyposażone w zmodyfikowane systemy rejestracji danych, które umożliwiają dokonywanie pomiaru i zapisu zmian poziomu zwierciadła pierwszego poziomu wodonośnego z częstotliwością 1 Hz. Wszystkie trzy piezometry zostały zlokalizowane w obrębie czynnych obszarów górniczych kopalń węgla kamiennego należących do Polskiej Grupy Górniczej Sp. z o.o., partnera przemysłowego w projekcie EPOS-PL. Piezometry P1 (50°04'13"N, 18°27'57"E) i P2 (50°04'10"N, 18°28'00"E) znajdują się na obszarze KWK ROW ruch Rydułtowy w Rybniku, natomiast piezometr P3 (50°07'35"N, 19°13'08"E) na terenie KWK Piast-Ziemowit ruch Ziemowit w Chełmie Śląskim. Piezometry P1 i P2 są usytuowane po przeciwnych stronach wychodni dominującej w tym rejonie dyslokacji tektonicznej w utworach karbonu. Jest to uskoki Kolejowy, który zrzuca warstwy karbońskie na północ o ok. 180 m. Rozciągłość uskoku w przybliżeniu pokrywa się z przebiegiem doliny rzeki Nacyny, podczas eksploatacji w jego rejonie następuje interakcja naprężeń tektonicznych z naprężeniami indukowanymi eksploatacją górnictwem.

System piezometrów uruchomiono 17 kwietnia 2019 r. Główne elementy zainstalowanego systemu stanowią: ceramiczna sonda pomiarowa Waterpilot FMX21 (Endress+Hauser), zapewniająca dokładność pomiarową na poziomie  $\pm 0,25$  mm i możliwość pracy w temperaturach od  $-5$  do  $60^{\circ}\text{C}$ , oraz rejestrator danych z konwerterem analogowo-cyfrowym (produkcji PM Ecology Sp z o.o.) i modulem GPRS, umożliwiającym kontrolowanie i modyfikowanie pracy rejestratora on-line oraz transmisję danych na docelowy serwer. Zastosowany rejestrator umożliwia programowanie rejestracji danych w interwałach od 1 sekundy do 24 godzin lub więcej, a wbudowana pamięć pozwala zapisać co najmniej 600 tys. mierzonych wartości. Rejestrator pracuje w zakresie temperatur od  $-20$  do  $60^{\circ}\text{C}$ . Lokalizację piezometrów przedstawiono na rycinie 3.

Zadaniem hydrometrycznego elementu systemu monitoringu wstrząsów jest ciągła rejestracja zmian położenia zwierciadła wody podziemnej pierwszego poziomu wodonośnego ( $h_{zw}$  [mm]) w czasie z częstotliwością 1 Hz i dokładnością 1 mm. Sam zapis szeregu czasowego jest prowadzony przez instrument w postaci zmian natężenia sygnału prądowego, następnie przeliczanego na aktualny poziom zwierciadła wody. Urządzenie przetwarza ciśnienie panujące w miejscu umieszczenia sondy na sygnał prądowy w zakresie od 4 do 20 mA, proporcjonalny do wysokości słupa wody ponad sondą. Ugięcie ceramicznej membrany sondy powoduje zmianę pojemności elektrycznej kondensatora utworzonego pomiędzy tą membraną a ceramicznym podłożem sondy. Zmiana ta jest przetwarzana na sygnał proporcjonalny do zmian ciśnienia. Sys-

tem, poprzez instalację rurki kompensacyjnej wyprowadzonej ponad poziom gruntu, automatycznie uwzględnia wahania ciśnienia atmosferycznego (Wlazło, 2019). Dane zawierające czas, pomierzone natężenie sygnału i przeliczony poziom zwierciadła wody w postaci plików tekstowych są zapisywane na serwerze pracującym w GIG jeden raz na dobę.

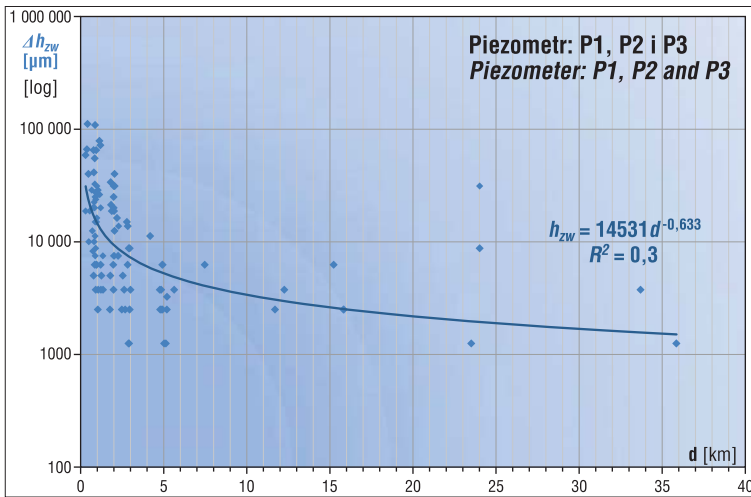
Podobnie do danych z grawimetrów gPhoneX uzyskiwane wyniki przedstawiono na przykładzie piezometrów P1 i P2 zlokalizowanych w pobliżu KWK Rydułtowy z uwagi na możliwość śledzenia zdarzeń z pełnego pola falowego. Piezometry P1 i P2 położone są w północno-wschodniej części obszaru górniczego kopalni Rydułtowy. Zainstalowano je w sąsiedztwie uregulowanego koryta rzeki Nacyny w odległości 55 m na N (P1) i 45 m na S (P2) od jego osi. Z uwagi na morfologię powierzchni terenu charakteryzującą się dużymi deniwelacjami bliskość koryta rzeki była gwarantem nawiercenia poziomu wodonośnego (Frolik i in., 2020). Dodatkowym kryterium lokalizacji piezometrów był przebieg uskoku stanowiącego naturalną granicę eksploatacji, a jednocześnie strefę, w której w przeszłości, w trakcie eksploatacji w sąsiedniej KWK Marcel, dochodziło do wielu wysokoenergetycznych wstrząsów górniczych powodujących szkody zarówno w infrastrukturze podziemnej kopalni, jak i budynkach na powierzchni terenu. Piezometry zlokalizowano po obydwu stronach płaszczyzny uskokowej, co pozwala również na obserwację dodatkowych efektów, jakie w propagacji fal sejsmicznych wywołuje obecność uskoku.

### Czułość systemu

Analiza dotychczas zarejestrowanych zdarzeń ko-sejsmicznych w obrazie danych z rejestracji zmian poziomu zwierciadła wody podziemnej z okresu od 17.04.2019 r. do 1.05.2020 r. pozwala ocenić że, możliwość rejestracji danego wstrząsu górniczego jest przede wszystkim uzależniona od odległości jego ogniska od stanowiska pomiarowego. Zależność pomiędzy dotychczas zarejestrowanymi przez system zmianami wysokości zwierciadła wody podziemnej a odległością od ognisk wstrząsów górniczych piezometrów P1, P2 i P3 przedstawia rycina 8.

Przedział odległości wstrząsów górniczych wywołujących ruchy wód podziemnych w piezometrach w zbiorze zarejestrowanych zdarzeń hydrosejsmicznych zmienił się od ok. 0,1 do 36 km. Największą liczbę zdarzeń zarejestrowano w strefie o promieniu 5 km. Estymacja zależności amplitudy zmian poziomu zwierciadła wody od odległości epicentralnej funkcją potęgową dla piezometrów P1, P2, P3 wskazuje na znacznie słabsze (współczynnik determinacji  $R^2$  na poziomie 0,35) jej dopasowanie niż amplitudy sygnałów grawitacyjnych. Na amplitudę ruchu wód podziemnych silnie wpływają więc inne czynniki aniżeli odległość epicentralna od ogniska wstrząsu, a w szczególności jego energia (magnituda).

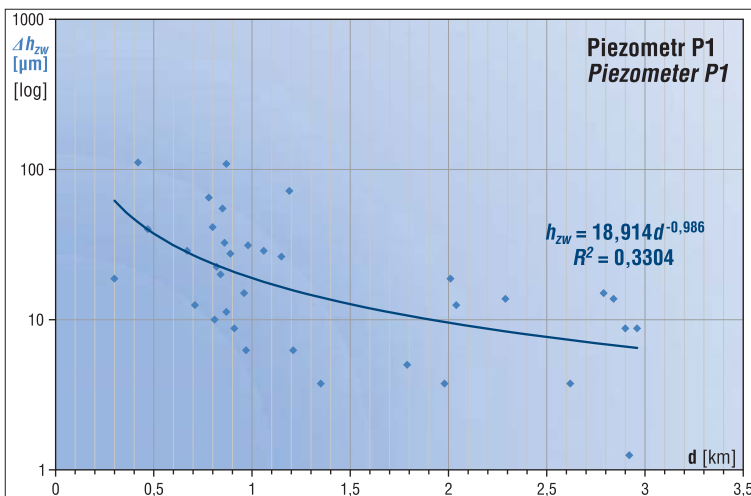
Statystyczna zależność amplitudy zmian poziomu zwierciadła wód podziemnych od odległości od ognisk wstrząsów górniczych nieznacznie pogarsza się dla piezometru P1 dla zbioru zdarzeń zarejestrowanych w ich obszarze epicentralnym  $d = 0-3$  km. Pewna poprawa dopasowania krzywej modelowej jest obserwowana dla piezometru P2 dla wspomnianego dystansu epicentralnego. Ilustrują to wykresy zależności przedstawione odpowiednio na rycinie 9 i 10 oraz parametry dopasowań zestawione w tabeli 2. Estymacja zależności funkcją potęgową daje wartości



←

**Ryc. 8.** Zmiany poziomu zwierciadła wody  $h_{zw}$  zarejestrowane w piezometrach P1, P2 i P3 w zależności od odległości ognisk wstrząsów górniczych  $d$  z okresu 17.04.2019–1.05.2020 r. Zbiór danych obejmuje 108 rekordów pochodzących od 59 wstrząsów

**Fig. 8.** Changes in the water table level  $h_{zw}$  recorded in piezometers P1, P2 and P3 depending on the distance of mining tremor foci  $d$  from the period of 17.04.2019–1.05.2020. The data set includes 108 records from 59 shocks



←

**Ryc. 9.** Zmienność maksymalnej amplitudy pionowej zmiany poziomu zwierciadła wody  $h_{zw}$  od odległości epicentralnej  $d$  wstrząsu górniczego z okresu 17.04.2019–1.05.2020 r. (35 wstrząsów) obserwowana w piezometrze P1

**Fig. 9.** The variability of the maximum vertical amplitude of the water level change  $h_{zw}$  from the epicentral distance  $d$  of the mining shock from the period 17.04.2019–1.05.2020 (35 shocks) observed in piezometer P1

**Tab. 2.** Parametry najlepszego dopasowania w analizie regresji dla  $h_{zw}$ : równanie regresji, współczynnik determinacji oraz współczynnik zbieżności

**Table 2.** Best fit parameters in regression analysis for  $h_{zw}$ : regression equation, determination factor, and convergence factor

Liczebność zbioru Number of events	Zmienna Variable	$h_{zw}P1$	$h_{zw}P2$
40	równanie regresji regression equation	$18,914 \cdot d^{-0,986}$	$10,521 \cdot d^{-1,199}$
	$R^2$ [%]	33%	45%
	$\phi^2 = 1 - R^2$ [%]	77%	55%

współczynników determinacji  $R^2$  odpowiednio na poziomach 0,33 i 0,45.

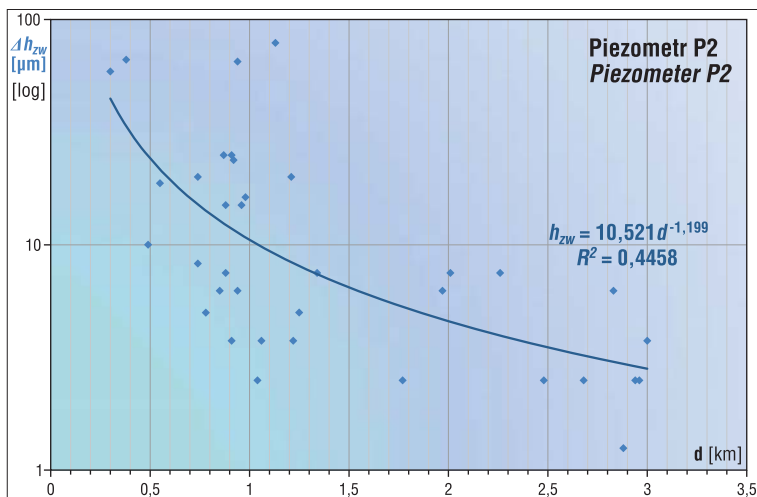
Na obydwu piezometrach wyróżnia się zapis silnego wstrząsu górniczego ( $M = 4$ ) z dn. 13.01.2020 r. Wystąpił on w odległości ok. 24 km na NE od stanowisk piezometrów i spowodował wyraźną zmianę poziomu zwierciadła wody. Pomimo że wzajemna odległość pomiędzy piezometrami P1 i P2 wynosi 100 m, to dla piezometru P1 położonego w skrzydle zrzuconym uskoku zarejestrowana zmiana poziomu zwierciadła wyniosła 31,25 mm, a dla piezometru P2 położonego w południowym skrzydle wiszącym uskoku jedynie 8,75 mm.

W porównaniu z grawimetrem pływowym gPhoneX-155 w piezometrach P1 i P2 są rejestrowane głównie sygnały generowane wstrząsami górniczymi, które wystąpiły w polu bliskim (do 3 km). Jest to obszar obejmujący wpływy eksploatacji górniczej jednej kopalni (piezometry P1 i P2 – KWK ROW ruch Rydułtowy, piezometr P3 – KWK Piast-Ziemowit). Amplituda sygnałów hydrosejsmicznych wy-

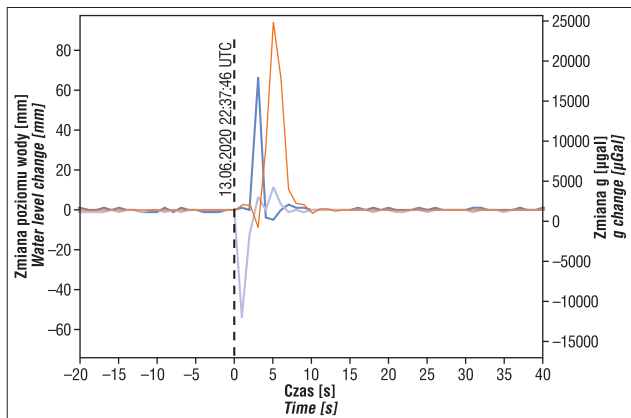
wołanych przez wstrząsy górnicze w analizowanym przedziale ich energii ( $M = 2,1-4,0$ ), w większej odległości od stanowisk pomiarowych (3–35 km) (ryc. 7), osiąga wartości oscylujące wokół 1 mm, tj. granicy dokładności pomiarowej sond systemu PM Ecology. Jest to poziom czułości o wiele mniejszy od uzyskiwanego w grawimetrach pływowych, gdzie dokładność pomiaru przemieszczenia pionowego jest rzędu 0,0001 mm. Tym samym system grawimetryczny pozwala na rejestrację dużo mniejszych przemieszczeń.

Skalę zmian poszczególnych wielkości pomiarowych systemu wywołanych wstrząsem górniczym o magnitudzie  $M = 2,9$ , którego epicentrum było zlokalizowane w odległości ok. 400 m od piezometrów P1 i P2 oraz ok. 500 m od grawimetru gPhoneX-155, przedstawiono na rycinie 11. Wstrząs był wywołany eksploatacją górniczą prowadzoną na południe od uskoku (w skrzydle wiszącym). Spowodował on zmianę  $g$  o amplitudzie ok. 23 500 Gal. Maksymalna amplituda wychyleń poziomu wody w piezometrach

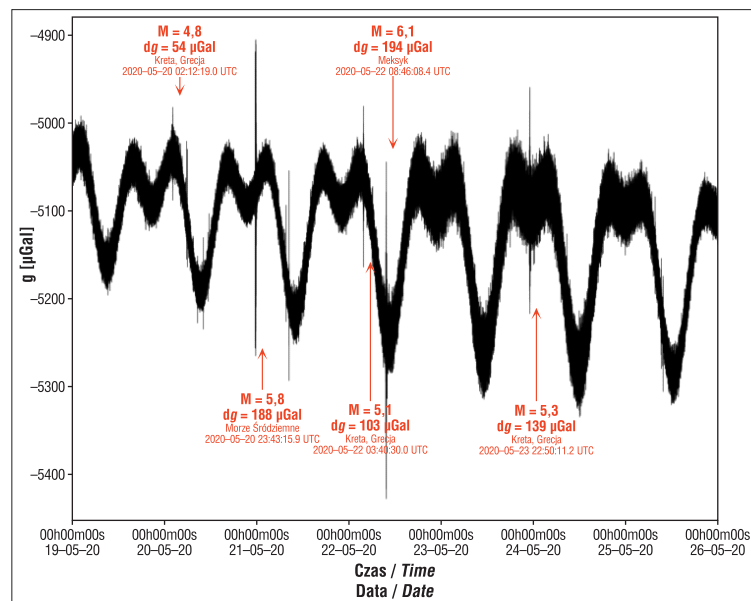




**Ryc. 10.** Zmienność maksymalnej amplitudy pionowej zmiany poziomu zwierciadła wody  $h_{zw}$  od odległości epicentralnej  $d$  wstrząsu górniczego z okresu 17.04.2019–1.05.2020 r. (37 wstrząsów) obserwowana w piezometrze P2  
**Fig. 10.** The variability of the maximum vertical amplitude of the water level change  $h_{zw}$  from the epicentral distance  $d$  of the mining shock from 17.04.2019–1.05.2020 (37 shocks) observed in piezometer P2



**Ryc. 11.** Zapisy zmian pola siły ciężkości i poziomu wód podziemnych w piezometrach P1 i P2 generowanych wstrząsem górniczym w strefie bliskiej (przykład)  
**Fig. 11.** Time series of gravity and water table changes in piezometers P1 and P2, induced by mining tremor in a near source zone (an example)



leży w przedziale 50–65 mm, a obliczona przez całkowanie krzywej  $g$  amplituda przemieszczenia górotworu jest wielokrotnie niższa i wynosi ok. 0,3 mm.

Uwagę zwraca różnica kierunku wychylenia poziomu wody w zależności od położenia piezometru względem wschodniej uskoku kolejowego, pomimo że odległość pomiędzy nimi jest niewielka (ok. 100 m). W skrzydle zrzuconym uskoku (piezometr P1) poziom wody obniża się, natomiast w skrzydle wiszącym (piezometr P2) ulega on podniesieniu. Charakter zmiany poziomu wody w skrzydle wiszącym powiela zmianę pola siły ciężkości zarejestrowaną grawimetrem gPhoneX-155, który jest również zlokalizowany w obszarze skrzydła wiszącego uskoku Kolejowego. Kierunki przemieszczenia wód i masywu karbońskiego powielają układ sił, którym poddany był górotwór w trakcie ruchów tektonicznych orogenezy waryscyjskiej, których efektem jest uskok Kolejowy.

### MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA DANYCH Z SYSTEMU

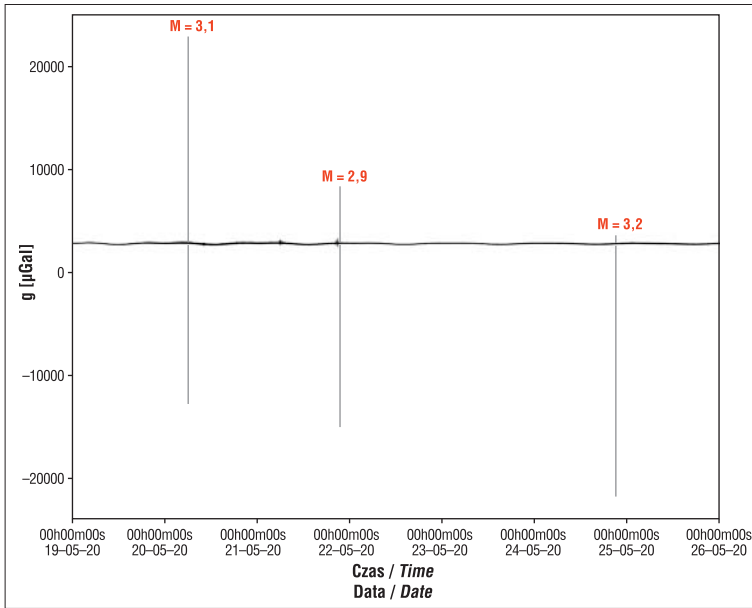
Grawimetryczno-hydrometryczny system monitoringu dostarcza ciągłych danych o wolnozmiennych pionowych ruchach górotworu ( $f < 0,5$  Hz) i przypowierzchniowych wód podziemnych w obszarze GZW pod wpływem eksploatacji górniczej (osiadania, wstrząsy górnicze), a także globalnych zjawisk geodynamicznych, takich jak m.in. pływy skorupy ziemskiej, pływy i sztormy oceaniczne czy naturalne trzęsienia ziemi. Rejestruje również sygnały grawisejsmiczne generowane na skutek silniejszych energetycznie wstrząsów górniczych z terenów eksploatacji kopalń miedzi Dolnego Śląska oraz kopalń czeskich z rejonu Ostrawy i Karwiny. Dane z systemu można wykorzystywać do analizy przyczyn i skutków wstrząsów górniczych powodujących szkody w podziemnej i powierzchniowej infrastrukturze budowlanej jako uzupełniające do danych sejsmometrycznych.

Charakterystyki kinematyczne i dynamiczne sygnałów grawi- i hydrosejsmicznych generowanych wstrząsami można wykorzystać w analizie mechanizmów odkształceń



**Ryc. 12.** Krzywa zmian składowej pionowej pola siły ciężkości ( $g$ ) w 1-sekundowych odcinkach czasu zarejestrowana przez grawimetr gPhoneX\_157 w cyklu tygodniowym (19.05.2020–26.05.2020 r.) z widocznymi pływami skorupy i zidentyfikowanymi dalekimi trzęsieniami ziemi  
**Fig. 12.** The curve of changes in the vertical component of the gravitational field ( $g$ ) in 1 second time intervals recorded by the gPhoneX\_157 gravimeter in a weekly cycle (19.05.2020–26.05.2020) with visible crust's tides and identified far earthquakes (vertical peaks)

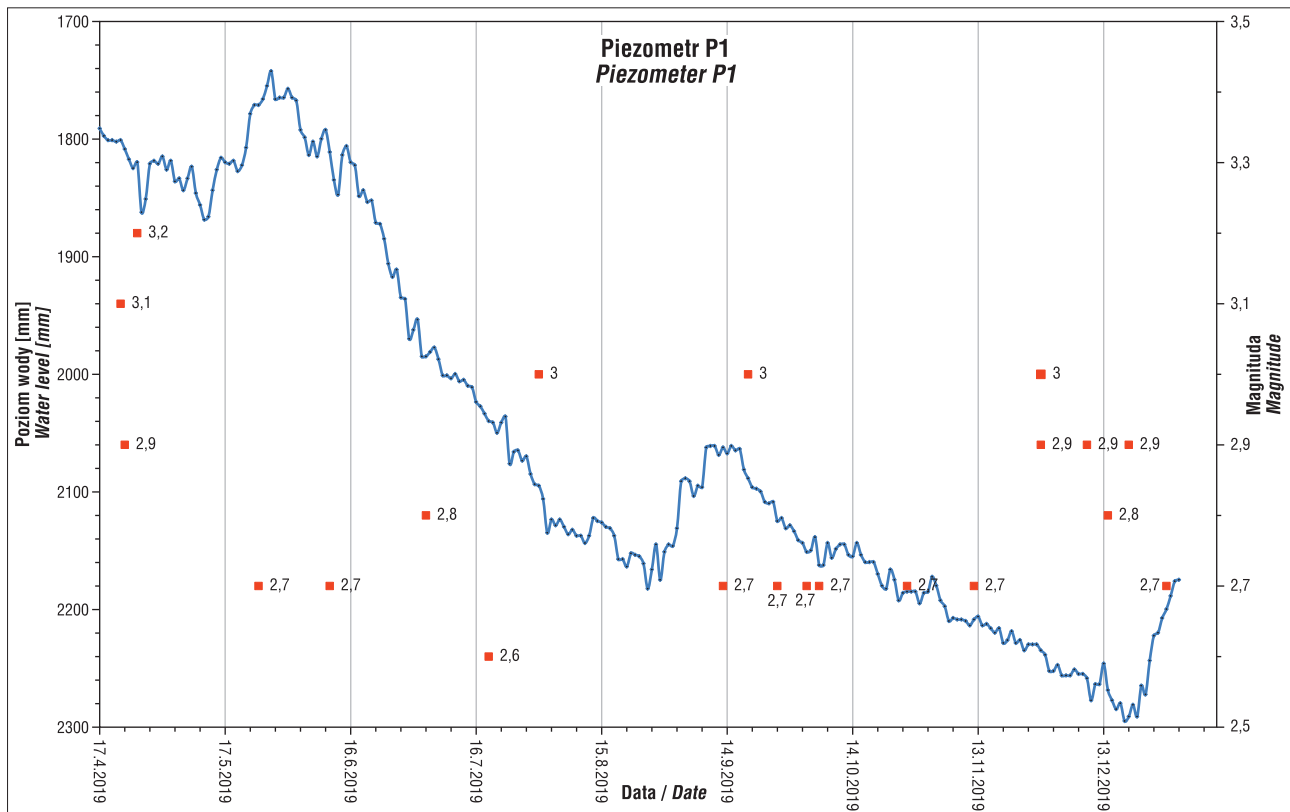




←

**Ryc. 13.** Krzywa zmian składowej pionowej pola siły ciężkości ( $g$ ) w 1-sekundowych odcinkach czasu zarejestrowana przez grawimetr gPhoneX\_155 w cyklu tygodniowym (20.04.2019–26.04.2020 r.) z widocznymi wysokoenergetycznymi wstrząsami górniczymi (pionowe piki opisane wielkością magnitudy)

**Fig. 13.** The curve of changes in the vertical component of the gravitational field ( $g$ ) in 1 second time intervals recorded by the gPhoneX\_155 gravimeter in a weekly cycle (20.04.2020–26.04.2020) with visible high energy mining tremors (vertical peaks annotated by magnitude)



**Ryc. 14.** Krzywa zmian zwierciadła wody ( $h_{zw}$ ) w dobowych odcinkach czasu zarejestrowana w piezometrze P1 wraz z magnitudą wstrząsów górniczych z okresu ok. 8 miesięcy (17.04.2019–03.01.2020 r.)

**Fig. 14.** The curve of water table changes ( $h_{zw}$ ) in daily time intervals recorded in the P1 piezometer together with the magnitude of mining tremors over a period of about 8 months (17.04.2019–03.01.2020)

w ogniskach wstrząsów powstających w wyniku superpozycji naprężeń powodowanych eksploatacją górnictwem i rezydualnych naprężeń w rejonach o zaburzonej geometrii warstw geologicznych (sedymencie lub tektonicznie). W strefach takich występują wstrząsy o relatywnie największej energii i odczuwalności na powierzchni (Goszcz, 1980; Marczak, Mutke, 2013; Dubiński, 2019).

Obserwacje grawimetryczne pozwalają określić nie tylko wielkość przemieszczeń pionowych masywu skalnego w trakcie wstrząsów, ale również, w odróżnieniu od danych sejsmometrycznych, wskazać na skalę przemieszczenia

masy wewnątrz skorupy ziemskiej. Dane hydrometryczne wskazują wprost wartości przemieszczeń zwierciadła wód gruntowych. Ich porównanie wskazuje, że w strefie bliskiej ogniska wstrząsu górniczego współczynnik amplifikacji drgań przez zawodnione grunty przykrywające górotwór skalisty sięga wartości 100 (porównanie wykresów z ryc. 6, 8 i 9). Przekłada się to na wzrost odczuwalności drgań przez ludzi i obiekty budowlane w rejonach, w których poziom wód gruntowych zalega blisko powierzchni ziemi.

Zbiory danych rejestrowanych przez grawimetryczno-hydrometryczny system pomiarowy pozwalają na prowa-

dzenie krótko, średnio i długoterminowych analiz zjawisk zachodzących w przekształcanym działalnością górnictwa środowisku geologicznym. Ilustrują to przykładowe wykresy przedziałach ( $g$  – ryc. 12 i 13,  $h_{zw}$  – ryc. 14). Krzywe zmian  $g$  uwidaczniają, jak znaczna jest różnica amplitud sygnałów generowanych naturalnymi (trzęsienia ziemi) i antropogenicznymi (wstrząsy górnicze) źródłami. Dane pomiarowe gromadzone w ramach prowadzonego monitoringu będą udostępniane do celów naukowo-badawczych w postaci szeregów czasowych mierzonych parametrów oraz katalogów zdarzeń grawimetryczno-hydrometrycznych, razem z innymi produktami na cyfrowej platformie projektu EPOS-PL ([www.is-epos.eu](http://www.is-epos.eu)).

## PODSUMOWANIE

Z przedstawionej analizy zbioru danych zebranych z okresu ok. 1 roku, charakteryzujących ruchy górotworu skalistego (dane grawimetryczne) oraz wahań zwierciadła wód podziemnych (hydrometria) generowane wstrząsami górniczymi, widać wyraźnie, jak obecność wody w przypowierzchniowych warstwach gruntowych wzmacnia amplitudę drgań przenoszonych falami sejsmicznymi w paśmie bardzo małych częstotliwości (<0,5 Hz) przy przejściu z masywu skalnego do gruntów.

Zgromadzenie większej ilości danych z dłuższych przedziałów czasu pozwoli na przeprowadzenie średnio- i długoterminowych analiz wpływu na regionalne pole siły ciężkości w GZW zmian w rozkładzie masy w górotworze na skutek eksploatacji kopalni. Element ten może stanowić istotny wkład przy tworzeniu sejsmologicznych modeli prognostycznych w zakresie antropogenicznej aktywności sejsmicznej z wykorzystaniem prekursorów grawimetrycznych i hydrologicznych, a także przy ustalaniu genezy niektórych wstrząsów górniczych. Dane te będą mogły być wykorzystane również w ocenie intensywności drgań terenów Górnego Śląska generowanych dalekimi wstrząsami sejsmicznymi (naturalnymi i antropogenicznymi), a także w analizach wpływu zmian klimatu na środowisko geologiczne i przyrodnicze regionu.

Niniejsza praca została zrealizowana w ramach projektu pt. *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). Numer projektu: POIR.04.02.00-14-A003/16-00. Autorzy dziękują Recenzentom za cenne uwagi, które bardzo pomogły udoskonalić pierwotną wersję manuskryptu, czyniąc ją bardziej zrozumiałą i przystępną dla Czytelnika.

## LITERATURA

DUBIŃSKI J., STEC K., BUKOWSKA. 2019 – Geo-mechanical and tectono-physical conditions of mining-induced seismicity in the upper silesian coal basin in Poland: a case study. *Arch. Min. Sci.*, 64 (1): 163–180.

- FAJKLEWICZ Z. 1980 – Mikrogravimetria górnictwa. Wyd. Śląsk, Katowice.
- FAJKLEWICZ Z. 2007 – Grawimetria stosowana. Wyd. Nauk.-Dydak. AGH, Kraków.
- FROLIK A., SIWEK S., KIEREPKA W. 2020 – Wahań zwierciadła wód podziemnych pod wpływem wstrząsów górniczych w obszarze górnictwa kopalni Rydułtowy. *Prz. Geol.*, 68 (3): 204–210.
- GOSZCZ A. 1980 – Wpływ naprężeń tektonicznych na niektóre własności skał i warunki górnicze w północno-wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). *Zesz. Nauk. AGH, Geologia*, 27.
- JACOBY W., SMILDE L.P. 2009 – Gravity Interpretation. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- KOPYLOVA G.N., LYUBUSHIN A.A., BOLDINA S.V. 2019 – Statistical Analysis of Precision Water Level Data from Observations in a Seismically Active Region: Case Study of the YuZ-5 Well, Kamchatka. *Seismic Instruments*, 55 (5): 507–523.
- KOTYRBA A., KORTAS Ł. 2020 – Co-seismic signals of mining tremors in continuous recordings of gravity by gPhoneX tidal gravimeters. *Inter. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 129: 104288.
- KORTAS Ł. 2020 – Sejsmo-grawitacyjne sygnatury wstrząsów górniczych w ciągłych zapisach siły ciężkości grawimetrów pływowych gPhoneX. *Prz. Górn.*, 3 (76): 37–44.
- KOWALSKI W.C. 1988 – Geologia inżynierska. Wyd. Geol., Warszawa.
- MARCAK H., MUTKE G. 2013 – Seismic activation of tectonic stresses by mining. *J. Seismolog.*, 17 (4): 1139–1148; doi: 10.1007/s10950-013-9382-3
- MICRO-g LA COSTE 2013a – gPhoneX. Version 4.0.01, PN: 115-550-002E. 01 October 2013.
- MICRO-g LA COSTE 2013b – gMonitor Gravity Data Acquisition and Processing Software User's Manual. Version 2.0. PN: 115-550-001B. 01 October 2013.
- MICRO-g LA COSTE 2016 – Odin Levelling Platform Operation Manual. PN: 115-550-004A. 15 July 2016.
- 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. *J. Sustain. Min.*, 198–207
- NAWA K., SUGIHARA M. 2011 – Continuous gravity observations with gPhones and a CG3M at Hachijo Island, Japan, Abstract, 116<sup>th</sup> meeting of the Geodetic Society of Japan: 18.
- NIEBAUER T.M., MACQUEEN J., ALIOD D., FRANCIS O. 2011 – Monitoring earthquakes with gravity meters. *Geod. Geodyn.*, 2 (3): 71–75.
- RUMMEL R., HORVATH M., YI W., ALBERTELLA A., BOSCH W., HAAGMANS R. 2011 – GOCE, Satellite Gravimetry and Antarctic Mass Transports. *Surv. Geophys.*, 32: 643–657.
- 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++. 42<sup>nd</sup> COSPAR Scientific Assembly. Held 14–22 July Pasadena, CA, USA: 37–18.
- WAKITA H. 1975 – Water wells as possible indicators of tectonic strain. *Sci.*, 189: 553–555.
- WANG C., CHIA Y. 2008 – Mechanism of water level changes during earthquakes: Near field versus intermediate field. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12402.
- WLAZŁO P. 2019 – Instalacja 3 zestawów systemu pomiarowego do automatycznego monitorowania poziomu zwierciadła wody. Dokumentacja powykonawcza PM Ecology Sp. z o.o. Gdynia, pr. niepubl.
- VAN CAMP M., VAUTERIN P. 2005 – Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides. *Comp. Geosci.*, 31 (5): 631–640.
- [www.dgfi/tu.eu](http://www.dgfi/tu.eu)  
[www.emsc-csem.org](http://www.emsc-csem.org)  
[www.esa.eu](http://www.esa.eu)  
[www.grss.eu](http://www.grss.eu)  
[www.is-epos.eu](http://www.is-epos.eu)

Praca wpłynęła do redakcji 1.07.2020 r.  
 Akceptowano do druku 8.10.2020 r.